

Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft
Technische Universität Darmstadt



**Möglichkeiten zur Optimierung von
Sanierungsmaßnahmen an Flußdeichen**

vom Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie der
Technischen Universität Darmstadt zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Jesper Steuernagel

aus Langen (Hessen)

Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h.c. U. Zanke

Korreferenten: Prof. Dr.-Ing. G. Heerten
Prof. Dr.-Ing. R. Katzenbach

Einreichungstermin: 28. Juni 2007

Prüfungstermin: 21. November 2007

Darmstadt 2008

„And when our worlds they fall apart
When the walls come tumbling in
Though we may deserve it
It will be worth it“

Martin L. Gore

Wissenschaftlicher Werdegang

1994 bis 2001	Studium des Bauingenieurwesens an der TU Darmstadt
2002 bis 2007	wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Fachgebiet und Versuchsanstalt für Wasserbau, TU Darmstadt

Diese Arbeit entstand auf Grundlage der Ergebnisse des von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) unter dem Aktenzeichen 18063 geförderten Forschungsprojekts „Schonung natürlicher Ressourcen durch den Einsatz von Recyclingmaterialien als Baustoff für Flußdeiche“ und des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Förderaktivität „Risikomanagement extremer Hochwasserereignisse (RIMAX)“ unter dem Kennzeichen 02WH0641 geförderten Forschungsprojekts „Sicherer Deich – Untersuchungen an einem Forschungsdeich im Maßstab 1:1 zur Verbesserung des Widerstandsverhaltens bzw. der Standsicherheit von Flußdeichen bei langeinstauenden Hochwassern und Deichüberströmung“.

„De net will dieken, mut wieken!“
(Wer nicht deichen will, muß weichen!)

alte friesische Redensart

„Wenn es einmal kommt,
wie es mehr als einmal schon gekommen ist,
so können wir auch hinterm Deich ersaufen!“

Theodor Storm, Der Schimmelreiter

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Grundlagen des Deichbaus	3
2.1	Begriffsdefinitionen	3
2.2	Historische Entwicklung des Deichbaus in Deutschland	3
2.3	Deichaufbau	7
2.4	Bemessungsgrundlagen	9
2.4.1	Wirtschaftliche Aspekte	9
2.4.2	Wiederkehrintervalle	10
2.4.3	Berücksichtigung der Klimaänderung	11
2.4.4	Konsequenzen für die erforderliche Deichhöhe	13
3	Motivation – Sanierungsbedarf an Flußdeichen in Deutschland	14
4	Gängige Sanierungsmaßnahmen	17
5	Untersuchungen zur Entwicklung neuartiger Sanierungsverfahren	21
5.1	Naturmaßstäbliche Untersuchungen zur Verwendung von Recyclingmaterial als Baustoff im Stützkörper	23
5.1.1	Versuchsaufbau	24
5.1.2	Materialeigenschaften der Sekundärrohstoffe	27
5.1.2.1	Korngrößenverteilung	28
5.1.2.2	Scherfestigkeit	29
5.1.2.3	Proctordichte	29
5.1.2.4	Wasserdurchlässigkeit	30
5.1.2.5	Stoffliche Zusammensetzung	31
5.1.2.6	Umweltverträglichkeit	32
5.1.3	Meßeinrichtungen	32
5.1.4	Beprobung des Sickerwassers	40
5.1.5	Versuchsbeschreibung	41
5.1.5.1	Einstauversuch 1	44
5.1.5.2	Einstauversuch 2	45

5.1.5.3	Einstauversuch 3	47
5.1.6	Versuchsergebnisse.....	48
5.1.6.1	Standsicherheit	48
5.1.6.2	Hydraulische Eigenschaften	50
5.1.6.3	Ergebnisse der Sickerwasseranalyse	59
5.1.7	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse	62
5.2	Maßnahmen zur Verbesserung der Erosionssicherheit von Deichen bei Überströmung.....	64
5.2.1	Versagensmechanismen an Deichen.....	65
5.2.2	Deckwerke – Stand der Technik	70
5.2.2.1	Deckwerke in Lockerbauweise	70
5.2.2.2	Kohärente Deckwerke.....	71
5.2.3	Geokunststoffe	72
5.2.3.1	Einsatzgebiete von Geokunststoffen	73
5.2.3.2	Verwendung von Geokunststoffen im Deich- und Dammbau	74
5.2.4	Hydraulische Untersuchungen zur Überströmungssicherheit von Deichen – Stand der Forschung.....	75
5.2.5	Untersuchungen an einem naturmaßstäblichen Versuchsdeich zur Erosionssicherheit von Flußdeichen bei Überströmung	79
5.2.5.1	Hydraulik der Deichüberströmung	81
5.2.5.2	Anforderungen an einen Erosionsschutzes aus Geokunststoffen....	90
5.2.5.3	Bemessungsansatz des Erosionsschutzes aus Geokunststoffen	93
6	Zusammenfassung und Ausblick	96
7	Literatur	99
7.1	Normen und sonstige Richtlinien und Regelwerke	99
7.2	Veröffentlichungen	100
7.3	Forschungsberichte.....	102
8	Anhang – Begriffsdefinitionen.....	104
8.1	Deicharten	104
8.2	Im Deichbau gebräuchliche Begriffe.....	105

Abbildungen

Abbildung 2-1: Begriffe bei Flußdeichen gemäß DIN 19712	3
Abbildung 2-2: Zeitliche Entwicklung der Querprofile von Seedeichen an der deutschen Nordseeküste (aus Küstenschutz in Schleswig-Holstein)	5
Abbildung 2-3: Zeitliche Entwicklung der Querprofile von Flußdeichen (Haselsteiner 2007)	6
Abbildung 2-4: Homogener Deich und Zonendeich, schematisch	8
Abbildung 2-5: Drei-Zonen-Deich nach DIN 19712	8
Abbildung 2-6: Vergleich Kosten zu Nutzen in Abhängigkeit des Schutzgrades (nach DVWK Merkblatt 209).....	10
Abbildung 2-7: Regionen in Baden-Württemberg mit einheitlichen Klimaänderungsfaktoren (LfU 2005)	12
Abbildung 3-1: Hochwassergefahrenkarte des Rheins für Hessen	15
Abbildung 4-1: Homogener, nicht ausgebauter Deich	18
Abbildung 4-2: Regelquerschnitt des Deichausbaus am Rhein.....	18
Abbildung 4-3: Arbeitsschritte einer Standardsanierung an Rheinwinterdeichen	19
Abbildung 4-4: Regelquerschnitt des Deichausbaus am Rhein mit Sperrwand.....	19
Abbildung 4-5: Regelquerschnitt des Deichausbaus am Main mit Dichtwand	20
Abbildung 4-6: Querschnitt des Deichausbaus mit Spund- oder Dichtwand	20
Abbildung 5-1: Aufbau des Forschungsdeichs, schematisch	25
Abbildung 5-2: Querschnitt des Forschungsdeichs	26
Abbildung 5-3: Einbau der verschiedenen Baumaterialien	26
Abbildung 5-4: Korngrößenverteilung der Sekundärrohstoffe.....	28
Abbildung 5-5: Scherfestigkeit der Sekundärrohstoffe	29
Abbildung 5-6: Ergebnis des Proctorversuchs der verwendeten MV-Schlacke	30
Abbildung 5-7: Ergebnis des Proctorversuchs des verwendeten RC-Baustoffs	30
Abbildung 5-8: Stoffliche Zusammensetzung der verwendeten MV-Schlacke.....	31
Abbildung 5-9: Stoffliche Zusammensetzung des verwendeten RC-Baustoffs.....	31
Abbildung 5-10: Instrumentierung des Forschungsdeichs, Draufsicht.....	33
Abbildung 5-11: Durchführung einer Inklinometermessung.....	34

Abbildung 5-12: Lage der Inklinometermeßstellen, Draufsicht.....	34
Abbildung 5-13: Koordinatensystem für die Verschiebungsrichtungen der Inklinometermessungen.....	35
Abbildung 5-14: Installation der Feuchtemeßsensoren während dem Bau des Versuchsdeichs	36
Abbildung 5-15: Neben- und Hauptverteilerkästen des Feuchtemeßsystems	36
Abbildung 5-16: Lage der Sickerwasserpegel (schematisch)	37
Abbildung 5-17: Sickerwassermeßwehrkasten mit Meßsystem Thalimedes	38
Abbildung 5-18: Zentrales Datenerfassungssystem	40
Abbildung 5-19: Versuchsdeich während des zweiten Einstauversuchs	41
Abbildung 5-20: Abpumpen des Wassers im Einstaubereich	42
Abbildung 5-21: Eimermessung zur Sickerwasserabflußbestimmung	43
Abbildung 5-22: Wasseraustritt aus der landseitigen Böschung im Bereich des RC- Baustoffs (Versuch 1)	45
Abbildung 5-23: Gefrorener Böschungsfuß (Versuch 2)	46
Abbildung 5-24: Verschiebungen in den Hauptachsen, Versuch 2	49
Abbildung 5-25: Verschiebungen in den Hauptachsen am Meßpunkt B1, Nullmessung	50
Abbildung 5-26: Zeitlicher Verlauf der Sickerwasserpegelstände, Versuch 2	51
Abbildung 5-27: Zeitlicher Verlauf der Sickerwasserpegelstände, Versuch 3	52
Abbildung 5-28: Verlauf der Sickerlinien in den beiden Deichabschnitten (Versuch 2)	53
Abbildung 5-29: Verlauf der Sickerlinien in den beiden Deichabschnitten (Versuch 3)	53
Abbildung 5-30: Feuchteverteilung im Deichkörper, MV-Schlacke-Bereich (Versuch 2)	54
Abbildung 5-31: Feuchteverteilung im Deichkörper, RC-Baustoff-Bereich (Versuch 2)	54
Abbildung 5-32: Sickerwasserabfluß (Versuch 2)	56
Abbildung 5-33: Niederschläge während des Versuchszeitraums (Versuch 2).....	56
Abbildung 5-34: Sickerwasserabfluß (Versuch 3)	57
Abbildung 5-35: Niederschläge während des Versuchszeitraums (Versuch 3).....	57

Abbildung 5-36: Verlauf der Bodentemperatur während des Versuchsverlaufs (Versuch 2).....	58
Abbildung 5-37: Verlauf der Bodentemperatur während des Versuchsverlaufs (Versuch 3).....	58
Abbildung 5-38: Maximale Blei- und Arsenkonzentration am Pegel Magdeburg während des Elbehochwassers 2002 (Krüger 2005).....	63
Abbildung 5-39: Beginn der Überströmung eines Flußdeichs	64
Abbildung 5-40: Quelltrichter im Deichhinterland	66
Abbildung 5-41: Prinzipskizze Steinsatz.....	70
Abbildung 5-42: Prinzipskizze Steinschüttung.....	71
Abbildung 5-43: Untergliederung von Geokunststoffen (Saathoff & Zitscher 2001) ..	73
Abbildung 5-44: Geokunststoffe für verschiedene Anwendungen der Firma Naue: Kunststoffdichtungsbahn, Tondichtungsbahn, Geogitter, Erosionsschutzmatte, Vliesstoffmatte und Dränmatte (v. l. n. r.).....	74
Abbildung 5-45: Verwendung von Geokunststoffen in verschiedenen Bereichen des Deichbaus (Naue GmbH & Co. KG).....	75
Abbildung 5-46: Versuchsdeich mit leistungsstarker Pumpe zur Durchführung von Überströmungsversuchen	79
Abbildung 5-47: Draufsicht des Versuchsdeichs mit vordefinierten Überströmungsbereichen, schematisch	80
Abbildung 5-48: Vollkommener Überfall über einen Deich, schematisch	81
Abbildung 5-49: Annäherung der Deichüberströmung als Streichwehr	82
Abbildung 5-50: Überstauhöhe in Abhängigkeit vom Abfluß für unterschiedliche Überströmlängen.....	83
Abbildung 5-51: Überstauhöhe in Abhängigkeit der Überströmlänge bei einem Abfluß von 4,87 m ³ /s	83
Abbildung 5-52: Querschnitt eines überströmten Deichs mit Fließzuständen	84
Abbildung 5-53: Hydraulische Rauheit von Gras.....	86
Abbildung 5-54: Fließtiefe und mittlere Überströmungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom spezifischen Abfluß.....	87
Abbildung 5-55: Sohlschubspannungen auf der landseitigen Deichböschung bei Überströmung in Abhängigkeit vom spezifischen Abfluß	88

Abbildung 5-56: Berechnete Potentiallinien im Deichkörper des Forschungsdeichs bei Überstau der Deichkrone mit Überströmung der landseitigen Böschung; Querschnitt des stationären Zustands	90
Abbildung 5-57: Deichquerschnitt mit landseitigem Erosionsschutz (schematisch) ..	91
Abbildung 5-58: Erosionsschutz durch Kombination verschiedener herkömmlicher Geokunststoffprodukte der Firma Naue (schematisch).....	91
Abbildung 5-59: Wirkende Schubkräfte an einer überströmten Deichböschung	94
Abbildung 8-1: Deicharten nach DIN 19712.....	104

Tabellen

Tabelle 2-1: Klimaänderungsfaktoren in Baden-Württemberg (LfU 2005).....	12
Tabelle 5-1: Kostenvergleich natürlicher und recycelter Baustoffe.....	24
Tabelle 5-2: Durchlässigkeiten der verwendeten Baumaterialien.....	30
Tabelle 5-3: Maximale Sickerwasserstände und -abflüsse (Versuch 2)	46
Tabelle 5-4: Maximale Sickerwasserstände und -abflüsse (Versuch 3)	47
Tabelle 5-5: Analyseergebnisse des Sickerwassers im Bereich der MV-Schlacke, Grenzwerte der Trinkwasserverordnung (TrinkwV 2001) und Eluat- Zuordnungswerte der LAGA 20 (Az: 18063)	60
Tabelle 5-6: Analyseergebnisse des Sickerwassers im Bereich des RC-Baustoffs, Grenzwerte der Trinkwasserverordnung (TrinkwV 2001) und Eluat- Zuordnungswerte der LAGA 20 (Az: 18063)	61
Tabelle 5-7: Schadensbilder am Deich (nach RP Darmstadt 2006)	65
Tabelle 5-8: Unterschiedlich Formen der Erosion einer überströmten Grasnarbe (nach CIRIA 1987)	68
Tabelle 5-9: Erfahrungswerte der kritischen Sohlschubspannung $\tau_{0, \text{krit}}$ (aus Schneider Bautabellen, 1994)	88
Tabelle 5-10: Hydraulische Parameter der Deichüberströmung.....	89

Anlage

Zeitlicher Verlauf der Sickerwasserpegelstände

Symbole

A	[m ²]	Fließquerschnitt
B	[m]	Breite
c	[kN/m ²]	Kohäsion
d	[m]	Dicke des Erosionsschutzes
Fr	[-]	Froude-Zahl
$f_{T,K}$	[-]	Klimaänderungsfaktor
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
H	[m]	Höhe
h	[m]	Fließtiefe
h_m	[m]	mittlere Überfall- bzw. Überstauhöhe
$h_{\bar{u}}$	[m]	Überfall- bzw. Überstauhöhe
I_E	[-]	Energieliniengefälle
k_f	[m/s]	Durchlässigkeit
k_{St}	[m ^{1/3} /s]	Stricklerbeiwert
L	[m]	Überfalllänge bzw. Breite des überströmten Bereichs
n	[s/m ^{1/3}]	Manning-Beiwert ($1/k_{St}$)
p	[N/m ²]	Druck
Q	[m ³ /s]	Abfluß
q	[m ³ /s/m]	spezifischer Abfluß
R_{hy}	[m]	hydraulischer Radius
T_n	[a]	Jährlichkeit
t	[m]	Tiefe der Gleitfuge
v	[m/s]	Fließgeschwindigkeit
v_m	[m/s]	mittlere Fließgeschwindigkeit

Möglichkeiten zur Optimierung von Sanierungsmaßnahmen an Flußdeichen

Symbole

α	[°]	Böschungsneigung
γ	[N/m ³]	Wichte
φ	[°]	Reibungswinkel
μ	[-]	Überfallbeiwert für frontal angeströmte, gerade Überfälle
μ_s	[-]	Überfallbeiwert für Streichwehre
ρ	[kg/m ³]	Dichte
ρ_{Pr}	[kg/m ³]	Proctordichte
σ	[kN/m ²]	Normalspannung
τ	[kN/m ²]	Schubspannung
τ_0	[kN/m ²]	Sohlschubspannung

1 Einleitung

Bereits seit Jahrhunderten schützen die Menschen ihre an den großen Strömen gelegenen Siedlungen durch Deiche. Obwohl es in der Vergangenheit zu zahlreichen Innovationen und Verbesserungen im Aufbau und der Konstruktion von Deichen gekommen ist, stellen das hohe Alter, eine zu geringe Höhe oder eine generelle Vernachlässigung der Instandhaltung zahlreicher Deichabschnitte große Probleme in Bezug auf die Gewährleistung des Hochwasserschutzes dar. Durch dezentrale Hochwasserschutzmaßnahmen, wie Vergrößerung bzw. Reaktivierung natürlicher Retentionsflächen, Errichten von Poldern oder eine effektive Steuerung von Stauanlagen, kann zwar eine Hochwasserwelle gedämpft werden, doch haben gerade die Hochwasserkatastrophen der vergangenen Jahre erneut die Signifikanz eines effektiven technischen Hochwasserschutzes verdeutlicht: Denn ein Hochwasserereignis wird erst zu einer Hochwasserkatastrophe, wenn das Wasser nicht nur über die Ufer tritt, sondern bei einem Deichbruch durch die Deichlinie in das Deichhinterland gelangt. Der regelmäßigen Instandhaltung der Deiche und ggf. deren Sanierung bzw. Verstärkung muß daher ein hoher Stellenwert eingeräumt werden.

In Deutschland gewann der technische Hochwasserschutz aufgrund der in den letzten Jahren sehr häufigen schweren Hochwasserereignisse an Bedeutung. Die Bundesländer investieren jährlich große Summen in die Unterhaltung, die Sanierung und den Bau von Deichen, da die Gefahren für Mensch und Umwelt, sowie die durch Überschwemmungen verursachten ökologischen und ökonomischen Schäden enorme Ausmaße erreichen können. Beim Auguthochwasser 2002 an Moldau, Elbe und Donau kamen im Elbeeinzugsgebiet in Sachsen 21 und in Tschechien 17 Menschen ums Leben. Dieses Hochwasserereignis war in Bezug auf die Folgekosten das bisher schwerwiegendste in der Geschichte Mitteleuropas. Allein für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland wird der materielle Gesamtschaden auf 9,1 Mrd. Euro geschätzt (Böhme und Ockenfeld 2005).

Bestehende Deiche müssen, um dem Stand der Technik angepaßt zu werden, oftmals erhöht, verbreitert oder komplett erneuert werden. Hierzu werden erhebliche Mengen an Erdbaustoffen benötigt. Durch die alternative Verwendung von Sekundärrohstoffen könnten sowohl die Baukosten reduziert werden, als auch natürliche Rohstoffe geschont werden. Recyclingmaterialien wie Müllverbrennungsschlacken und Bauschutt fallen in ausreichenden Mengen an und sind als alternative Baustoffe geeignet. Sie werden in anderen Bereichen der Baubranche bereits seit Jahrzehnten erfolgreich eingesetzt.

Neben der Gewährleistung einer ausreichenden Standsicherheit bei langanhaltenden Hochwasserereignissen sollte zukünftig zudem auf eine verbesserte Erosionssicherheit der Deiche bei Überströmungen geachtet werden, da Deichüberströmungen in

der Regel die erhöhte Gefahr eines Deichbruchs mit sich bringen. Ein Deich in herkömmlicher Bauweise bietet durch eine gut ausgebildete Grasnarbe zwar einen Grundschutz gegen Erosion, kann aber den enormen Kräften, die bei der Überströmung von Deichen auf Krone und landseitige Böschung wirken, nicht standhalten. Da die Bemessung von Deichhöhen auf Hochwasserständen beruht, die aus statistisch ermittelten Niederschlägen bzw. Abflüssen hervorgehen und mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sind, ist die angebliche Hochwassersicherheit in Bezug auf Jährlichkeiten als sehr zweifelhaft anzusehen. Durch die generelle Verbesserung des Widerstandsverhaltens von Flußdeichen gegenüber der überströmungsbedingten Belastung wäre deren Standsicherheit auch beim Überschreiten der Bemessungswasserstände während extremer Hochwasserereignisse gegeben.

Um einen effektiven Hochwasserschutz durch Flußdeiche zukünftig realisieren zu können, ist neben der Erhöhung der Standsicherheiten von Deichen eine Optimierung der Sanierungsverfahren unter wirtschaftlichen und technischen Aspekten anzustreben. Diese Arbeit soll einen Beitrag dazu leisten.

2 Grundlagen des Deichbaus

2.1 Begriffsdefinitionen

Flußdeiche sind „Dämme aus Erd- und Baustoffen an Fließgewässern zum Schutz des Hinterlandes gegen Hochwasser, die im Gegensatz zu Stauhaltungsdämmen nur bei Hochwasser beansprucht werden“ (DIN 19712 „Flußdeiche“).

Der Unterschied zwischen einem Erddamm und einem Flußdeich besteht demnach per Definition in der Funktion und damit in der Belastungsdauer: Während ein Staudamm oder ein Stauhaltungsdamm an einem Kanal im Regelfall eingestaut ist, dient ein Flußdeich ausschließlich dem Hochwasserschutz und wird erst im Hochwasserfall, wenn der Fluß über die Ufer tritt, eingestaut. Ein Damm ist demnach fast immer den Belastungen durch Wasserdruck und Durchströmung ausgesetzt, ein Flußdeich dagegen nur für die Dauer des Hochwasserereignisses. Bei Seedeichen ist die Dauer der Belastung sogar noch geringer, da sie im Tidebereich vor Sturmfluten schützen sollen.

In Abbildung 2-1 ist ein typischer, schematischer Querschnitt eines Flußdeichs mit den Begriffen nach DIN 19712 „Flußdeiche“ dargestellt.

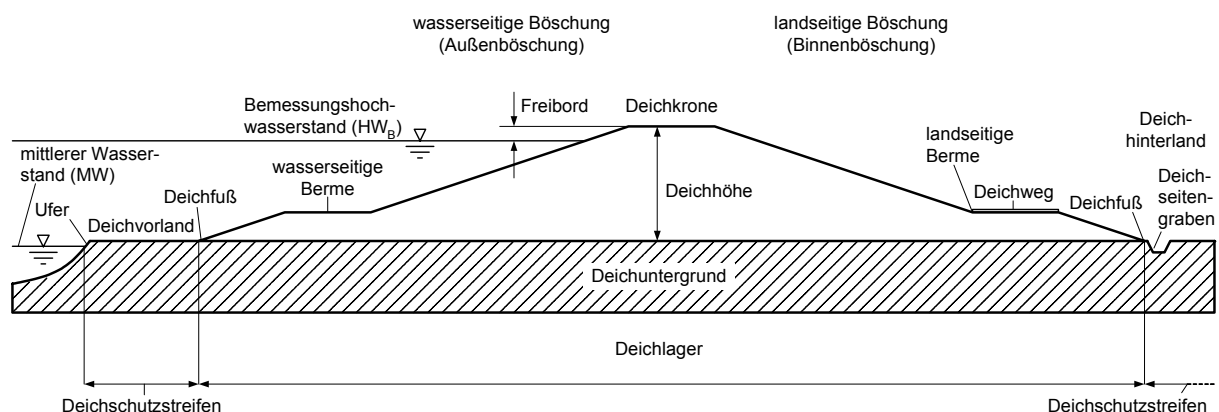


Abbildung 2-1: Begriffe bei Flußdeichen gemäß DIN 19712

Weitere für den Deichbau wichtige Begriffsdefinitionen befinden sich im Anhang.

2.2 Historische Entwicklung des Deichbaus in Deutschland

Die Nähe zu Fließgewässern und zur Küste war für die Entstehung von Siedlungen schon immer von großer Bedeutung. Zum einen stellte das Wasser einen wichtigen Verkehrsweg dar, zum anderen war es eine entscheidende Grundlage für Fischerei, Ackerbau und Viehzucht. Die fruchtbaren Flußauen wurden schon früh als Weide- und Ackerland genutzt, während man sich durch Siedlung in höher gelegenen Hang-

lagen der Flußtäler vor Hochwasser schützen konnte. In den häufig sehr flachen Küstenregionen mußte man andere Schutzmaßnahmen ergreifen.

Als Vorläufer der Seedeiche können die Warften – oder auch Wurten genannt – angesehen werden. Bereits vor über 2000 Jahren wurden in den nordwestdeutschen Marschgebieten und auf den Halligen Aufschüttungen für Gehöfte und Siedlungen zum Schutz vor Sturmfluten angelegt. Die Höhe der Warften wurde aus Mangel an hydrologischen oder hydraulischen Bemessungsgrundlagen nach Erfahrungswerten gewählt. Wenn eine Warft sich bei einer Sturmflut als zu niedrig erwies, wurde sie nachträglich erhöht. Der Aufbau besteht daher häufig aus verschiedenen Lagen, die jeweils nach Sturmfluten ergänzt wurden. Als Baumaterial wurde in der Regel Klei verwendet. Dieses an der Küste vorkommende Gemisch aus Ton und Sand ist aufgrund seiner guten Dichtwirkung besonders geeignet.

Die erste Form des Deichs war der Ringdeich in Form von Erdwällen, mit dem einzelne Objekte, Siedlungen oder Weideplätze für Tiere umschlossen und somit vor Hochwasser geschützt wurden. Erst durch die Verbindung dieser Deiche im Laufe der Jahrhunderte entstand eine Deichlinie entlang der Küste und den Unterläufen der großen Flüsse. Mit hoher Wahrscheinlichkeit wird der Beginn des Deichbaus an der deutschen Nordseeküste auf etwa 1000 n. Chr. datiert. Mit dem sogenannten „goldenen Ring“ entstand wahrscheinlich bereits im 12. und 13. Jahrhundert ein geschlossener Deichzug entlang der Nordseeküste. Am 16. Januar 1362 verschlang das Meer während der Marcellusflut, die etwa hunderttausend Menschen das Leben kostete, große Landflächen, was anschließend dazu führte, daß Deiche neben ihrer Schutzfunktion nun auch zur Landgewinnung herangezogen wurden. Durch Eindeichungen wurden verlorene Gebiete wieder trockengelegt und somit zur landwirtschaftlichen Nutzung wiedergewonnen (von Liebermann 1999).

Die Urform der Deiche hatte sehr steile Böschungen und nur eine geringe Höhe, um den Arbeitsaufwand möglichst gering zu halten. So betrug nach Aufzeichnungen aus dem Jahr 1244 die Böschungsneigung eines Deichs auf der Insel Wülgen in Flandern 1:2 auf der Wasserseite und sogar 1:1 auf der Binnenseite (Kramer 1992). Dies ist das älteste, schriftlich festgehaltene Deichprofil Westeuropas.

Bei späteren Seedeichen wurde die wasserseitige Böschung flacher ausgebildet. Außerdem achtete man auf breite Vorländer, um die Deiche lediglich bei Sturmflut zu belasten. Mit dem steigenden Meeresspiegel und dem damit verbundenen Küstenrückgang wurde der Deichfuß jedoch zunehmend beansprucht, so daß man im 16. Jahrhundert vermehrt zum Bau von Stackdeichen überging (Kramer 1992). Hier sollte der seeseitige Böschungsfuß durch Holzpfähle und Bohlen gesichert werden. Durch den fehlenden Wellenauslauf und die daraus resultierende erhöhte hydraulische Belastung kam es verstärkt zur Kolkbildung, so daß man im 17. Jahrhundert nach der Burchardiflut im Oktober 1634 wieder zum Bau von flacheren Deichen ü-

Möglichkeiten zur Optimierung von Sanierungsmaßnahmen an Flußdeichen

2 Grundlagen des Deichbaus

übergang. Die Entwicklung von Deichprofilen mit zunehmend flacheren Böschungen ist in Abbildung 2-2 dargestellt.

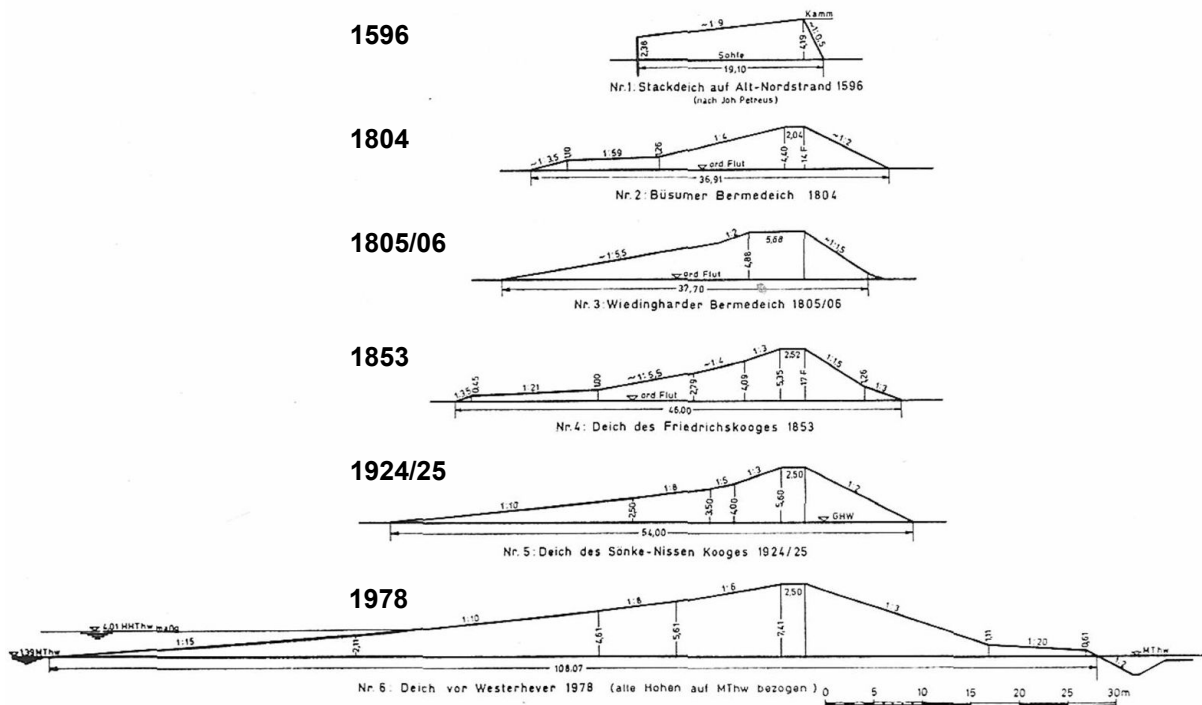


Abbildung 2-2: Zeitliche Entwicklung der Querprofile von Seedeichen an der deutschen Nordseeküste (aus Küstenschutz in Schleswig-Holstein)

Als Baustoff für die Deiche wurde mit Rücksicht auf die Transportmöglichkeiten der in unmittelbarer Nähe anstehende Boden verwendet. Die ersten Deiche in den Marschgebieten wurden komplett aus Klei gebaut. Mit dem Größerwerden der Deiche ging man aus Mangel an ausreichenden Mengen des Kleibodens dazu über, die Deiche mit einem Sandkern auszustatten und lediglich die Oberfläche mit einer Kleischicht zu stabilisieren bzw. abzudichten. Dies ist noch immer die gängige Bauart von Seedeichen an der deutschen Nordseeküste.

Die ersten Flußdeiche in Deutschland wurden vermutlich seit dem 9. Jahrhundert n. Chr. am Niederrhein und verstärkt im 12. Jahrhundert an der Elbe von holländischen Siedlern errichtet (Schmidt 2000). Daraufhin entstanden größere zusammenhängende Deichanlagen am Unterlauf des Rheins und an der holländischen Maas, sowie ab dem 13. Jahrhundert im Weichseldelta (Ehlers und Winkel 1947). Auch an der Oder waren im Jahr 1348 nachweislich Deiche vorhanden. Der älteste Haupt- oder Winterdeich wurde 1350 zwischen Kleve und Nijmegen am Niederrhein errichtet (Schmidt 2000).

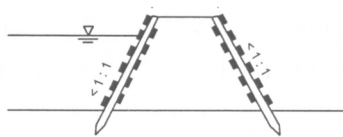
Auch bei den Flußdeichen änderte sich die Geometrie im Laufe der Jahrhunderte von steilen Böschungsneigungen hin zu immer flacher werdenden. Zunächst wurden

Möglichkeiten zur Optimierung von Sanierungsmaßnahmen an Flußdeichen

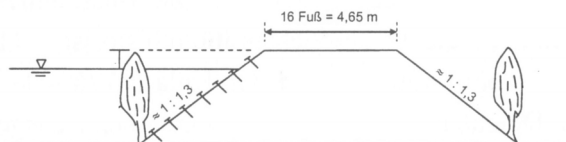
2 Grundlagen des Deichbaus

teilweise Flechtzäune verwendet, die mit Erdreich hinterfüllt wurden, um so steilere Böschungen zu ermöglichen (Schmidt 2000). Das verwendete Bodenmaterial stammte aus der Nähe der Deiche, da der Transport über längere Strecken ein großes Problem darstellte. Der Aufbau von Altdeichen kann daher abschnitts- und sogar lagenweise sehr heterogen sein. Je nach regionaler Verfügbarkeit wurde jedoch nach Möglichkeit bindiges Material verwendet, wie beispielsweise Auelehm. Inzwischen werden im Deichbau neben natürlichem Baumaterial auch synthetische Materialien, wie Dichtungsbahnen, Filter- oder Dränmatten, sowie Spund- oder Betonwände eingesetzt. Dies gilt sowohl für Fluß-, als auch für Seedeiche.

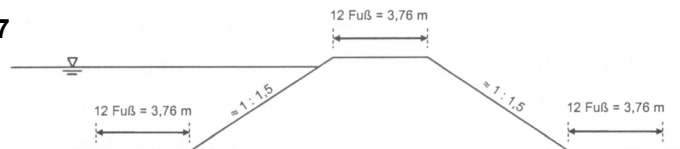
bis 1400



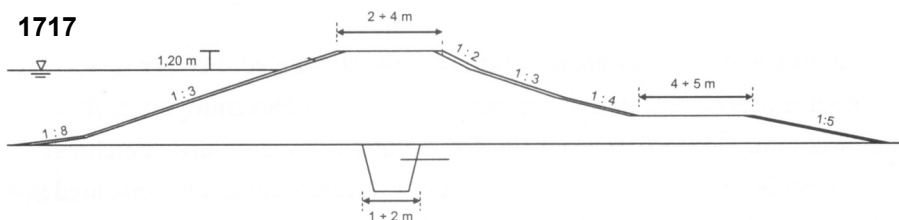
1575



1717



1717



1997

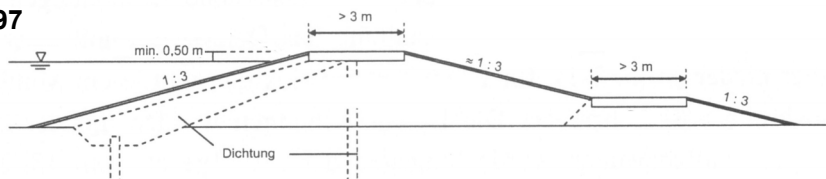


Abbildung 2-3: Zeitliche Entwicklung der Querprofile von Flußdeichen (Haselsteiner 2007)

Der Umgang mit Baumbestand in Deichnähe wurde im Laufe der Zeit auch sehr unterschiedlich gehandhabt. Zunächst wurde Bäumen im Bereich des Deichfußes noch eine Schutzwirkung zudedacht, bis man die Gefahr einer Beschädigung durch die Durchwurzelung des Deichkörpers erkannte. Inzwischen darf sich im Bereich des Schutzstreifens vor und hinter dem Deich kein Baum befinden.

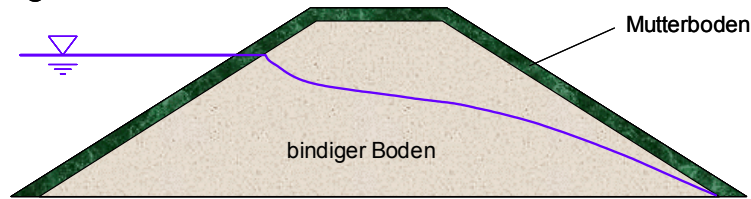
Seit Beginn des Deichbaus waren die Anwohner hinter dem Deich „deichpflichtig“ und mußten somit die Pflege und Unterhaltung von Deichteilstücken übernehmen. Vernachlässigungen dieser Pflicht wurden im Mittelalter schwer bestraft. So wurden nach dem Stedinger Deichrecht von 1424 Deichpflichtige, die ihre Deichstrecke in schlechtem Zustand hielten, und so einen Deichbruch verursachten, lebendig samt dem Holz und den Steinen ihres Hauses im Deich begraben. Auch heute noch sind die Eigentümer der Deiche zu deren Unterhaltung verpflichtet. Dies wird in Deutschland durch Gesetze der Bundesländer geregelt, in Hessen z. B. durch § 17 des Hessischen Wassergesetzes (HWG 2005). Schon im 14. Jahrhundert bestanden Deichordnungen, bevor im 15. Jahrhundert in Niedersachsen die ersten Deichverbände entstanden (Schmidt 2000). In den Deichordnungen waren auch bereits Hinweise zur baulichen Gestaltung der Deiche enthalten. Heute regelt die DIN 19712 „Flußdeiche“ die Vorgaben für den Deichbau in Deutschland.

Für die Gewährleistung des Hochwasserschutzes sind heute die Länder zuständig. Neben der Unterhaltung und Sanierung der Winterdeiche betrifft dies auch die Deichverteidigung im Hochwasserfall. Die zuständigen Behörden der Bundesländer veröffentlichten hierzu jeweils eigene Schriften, z. B. die hessische Instruktion zur Deichverteidigung (RP Darmstadt 2006).

2.3 Deichaufbau

Generell ist bei Flußdeichen zwischen den beiden unterschiedlichen Grundformen homogener und zonierter Deich zu unterscheiden. Während die meisten historischen Flußdeiche als homogene Deiche aus Auelehm erstellt wurden, wird bei Deichneubauten häufig ein Zonen-Deich mit einer wasserseitigen Dichtung aus Ton und einem Stützkörper aus Kiessand realisiert. Die beiden Bauformen sind in Abbildung 2-4 schematisch dargestellt.

Homogener Deich



Zonendeich

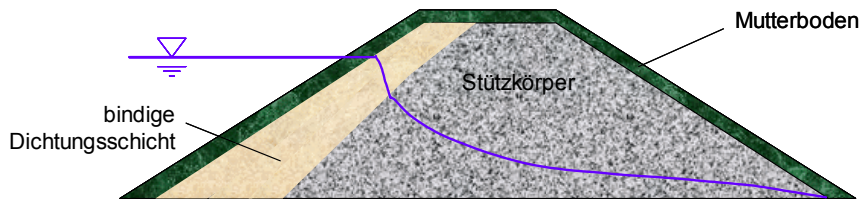


Abbildung 2-4: Homogener Deich und Zonendeich, schematisch

Der Vorteil eines Zonendeichs gegenüber eines homogenen Deichs liegt in der besseren Dichtungswirkung. Hier wird als Baustoff für den wasserseitigen Dichtungskörper in der Regel Ton oder Lehm mit sehr geringer Durchlässigkeit verwendet, wodurch die Sickerlinie im Deichkörper im Vergleich niedriger verläuft und weniger Sickerwasser anfällt. In DIN 19712 „Flußdeiche“ wird als erstrebenswerter Deichaufbau ein Drei-Zonen-Deich genannt, wobei ein landseitiger Dränkörper (Fußfilter) zur Entwässerung der landseitigen Böschung die dritte Zone darstellt (Abbildung 2-5).

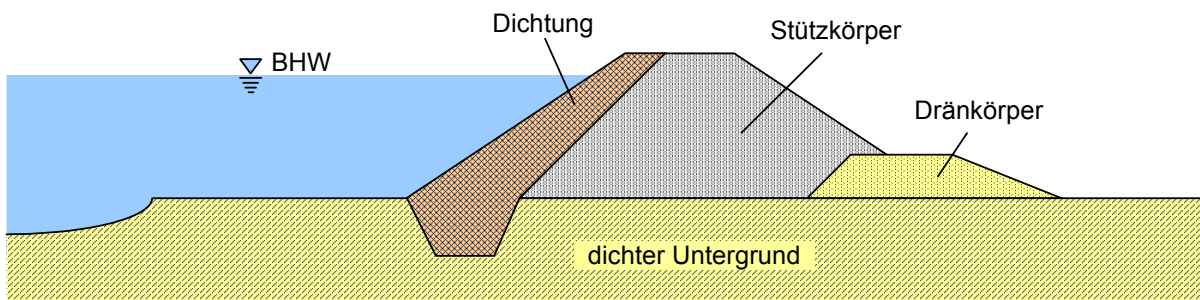


Abbildung 2-5: Drei-Zonen-Deich nach DIN 19712

Wichtiger Bestandteil eines Flußdeichs ist außerdem ein Deichverteidigungsweg, gelegentlich auch Deichhinterweg oder Deichweg genannt. Dieser sollte unmittelbar hinter der landseitigen Deichböschung liegen, um zu jedem Teil der Deichstrecke während eines Hochwasserereignisses den Zugang zu ermöglichen. Er ist oftmals leicht erhöht auf einer Berme angelegt und muß auch während eines Hochwassers mit schweren Kraftfahrzeugen befahren werden können und daher ausreichend gegen Aufweichen geschützt sein. Er wird in der Regel über dem Fußdrän als asphaltierter, betonierter oder gepflasterter Weg ausgebaut. In Ausnahmefällen kann ein Deichverteidigungsweg auch auf der Deichkrone verlaufen, die in diesem Fall jedoch

ausreichend breit und gesichert sein muß. Diese Variante sollte nur bei Platzmangel im Deichhinterland, z.B. aufgrund zu naher Bebauung, gewählt werden. Das Fehlen eines Deichverteidigungswegs ist Anlaß zur Deichsanierung, da ansonsten eine Deichverteidigung im Hochwasserfall nur eingeschränkt möglich ist.

2.4 Bemessungsgrundlagen

Die Bemessung der Höhe von Flußdeichen kann nicht, wie häufig fälschlich angenommen, allein mit mathematisch-physikalischen Berechnungsansätzen erfolgen. Der Bemessungshöhe liegen zwar in der Regel statistische Auswertungen vergangener Hochwasserereignisse zugrunde, doch gibt es keine grundlegende Regel, welches Wiederkehrintervall zur Wahl des sogenannten Bemessungshochwassers (BHW oder HW_B) herangezogen werden sollte. Da eine Überschreitung des Bemessungshochwassers nie ausgeschlossen werden kann, muß die Entscheidung für einen bestimmten Schutzgrad immer ein Kompromiß zwischen Sicherheitsbedürfnis der Öffentlichkeit, Belangen von Natur und Landschaft, sowie der Wirtschaftlichkeit der Maßnahme sein. Die Wahl des Bemessungshochwassers muß daher das Ergebnis einer Entscheidung sein, die aus einer umfassenden Gesamtbetrachtung in enger Zusammenarbeit aller beteiligten Fachleute zu treffen ist (DVWK 1989).

2.4.1 Wirtschaftliche Aspekte

Als Bemessungshochwasser, das durch Scheitelabfluß, -wasserstand, Dauer und Fülle gekennzeichnet ist, wird man in den meisten Fällen nicht das vermutlich größtmögliche Hochwasserereignis (PMF – Probable Maximum Flood) in Betracht ziehen. Vielmehr ist die Entscheidung das Ergebnis einer Kosten-Nutzen-Rechnung, wobei den Bau-, Betriebs und Unterhaltungskosten der Maßnahme das Schadenspotential gegenübergestellt wird. Bei der Quantifizierung des Schadenspotentials wird inzwischen zunehmend gefordert, neben Kapital- bzw. Vermögensschäden auch die Gefahr von Leib und Leben zahlenmäßig zu berücksichtigen. Als Grundsatz dieser Wirtschaftlichkeitsuntersuchung sollte gelten, daß die Summe der zu verhindernden Schäden größer sein muß, als die für Bau, Betrieb und Unterhaltung aufzuwendenden Kosten.

Das Bemessungshochwasser wird in der Regel durch sein mittleres Wiederkehrintervall T_n bzw. seine mittlere Überschreitungswahrscheinlichkeit $1/T_n$ charakterisiert. Das Wiederkehrintervall sollte so gewählt werden, daß sich aufgrund der Kosten-Nutzen-Rechnung der größte Kapitalwert für die Hochwasserschutzmaßnahme ergibt (LfU 2005). Zur Ermittlung des Schadenspotentials sollten die Überflutungsflächen für Hochwasserereignisse mit unterschiedlichen Wiederkehrintervallen bestimmt werden. Diese liegen zum Teil als Hochwassergefahrenkarten vor. In einem Optimierungsprozeß sollten zunächst alle möglichen Baumaßnahmen mit gleichem Schutzgrad miteinander verglichen und die kostengünstigste ermittelt werden. Der gegen-

überzustellende Nutzen ist die Schadensminderung und entspricht dem Erwartungswert des jeweils verhinderten Schadens. Er ergibt sich aus der Differenz aus dem zu erwartendem Schaden im Fall ohne Maßnahme und im Fall mit Maßnahme (LfU 2005).

Aus diesen Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen lassen sich die Verläufe der Kosten und Nutzen (Schadensminimierung) einer Maßnahme in Abhängigkeit des Schutzgrades darstellen (Abbildung 2-6). Die wirtschaftlichste Lösung stellt die größte Differenz zwischen dem Nutzen und den Kosten dar.

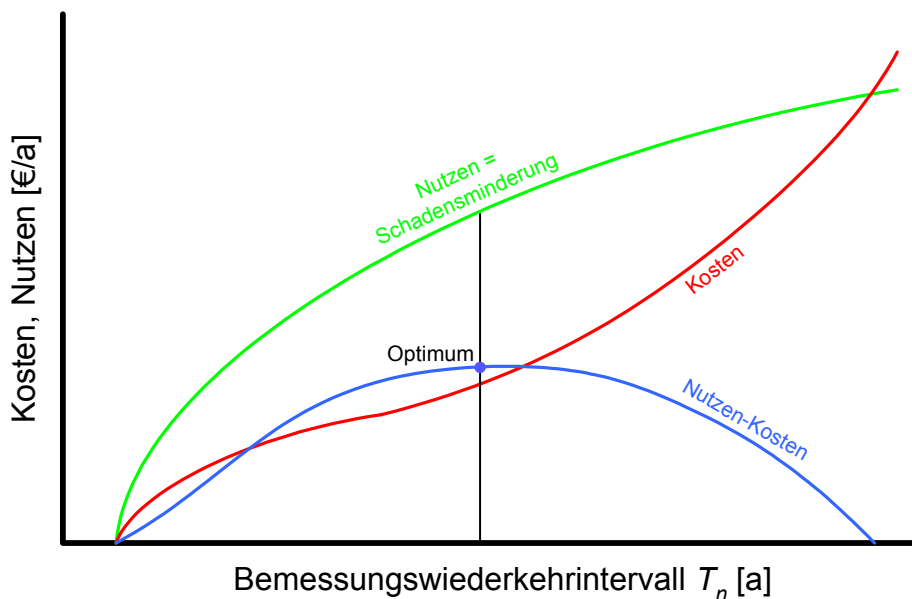


Abbildung 2-6: Vergleich Kosten zu Nutzen in Abhängigkeit des Schutzgrades (nach DVWK Merkblatt 209)

2.4.2 Wiederkehrintervalle

Die Bestimmung von Wiederkehrintervallen von Hochwasserereignissen, die üblicherweise in Jährlichkeiten ausgedrückt werden (HQ_{T_n} , z.B. HQ_{200} = 200jährliches Hochwasserereignis), erfolgt entweder durch die statistische Auswertung von an Pegeln gewonnenen Abflußdaten oder durch Berechnungen mit Niederschlags-Abfluß-Modellen (N-A-Modellen) auf Basis von Daten zu Gebietsniederschlägen. Eine geeignete Datengrundlage liefert zum Beispiel der KOSTRA-Atlas des Deutschen Wetterdienstes mit seinen Starkniederschlagshöhen (DWD 1997).

Für die Bemessung von Deichen sind die Scheitelwerte der Hochwasserwelle entscheidend. Zur Bestimmung der erforderlichen Deichhöhe müssen den Scheitelabflüssen die jeweiligen Wasserstände zugeordnet werden. Dies kann, soweit bekannt, anhand von Abflußkurven erfolgen, bei denen der Wasserstand über dem Abfluß aufgetragen ist. Abflußkurven werden aus langzeitlichen Pegelmessungen erstellt, gelten jedoch nur für den Flußabschnitt, in dem sich der Pegel befindet, da eine ge-

geometrische Veränderung des Fließquerschnitts entsprechend zur Veränderung der Wasserstands-Abfluß-Beziehung führt. In der Regel erfolgt die Zuordnung von Wasserständen zu den hydrologisch ermittelten Abflüssen daher durch hydrodynamisch-numerische Modelle. Diese müssen die Abflußvorgänge im Gewässer unter Berücksichtigung der vorhandenen Abflußquerschnitte und Bauwerke simulieren. Eine Kalibrierung der hydraulischen Fließgewässermodelle über die Anpassung von Rauheitsparametern sollte durch Nachrechnung historischer Hochwasserereignisse erfolgen, für die entsprechende Pegeldata vorliegen.

Neben den Bemessungswasserständen müssen zur endgültigen Bestimmung der erforderlichen Deichhöhen weitere Belastungsgrößen berücksichtigt werden. So können zum Beispiel Wind (durch Windstau und Wellen), Eis und Treibzeug einen zusätzlichen Wasseranstieg verursachen. Dieser wird durch den Freibord berücksichtigt, der als lotrechter Abstand zwischen Bemessungshochwasserstand und Deichkrone definiert ist. Seine Größe ist von der Deichhöhe abhängig. Es wird eine gestaffelte Vergrößerung des Freibordmaßes empfohlen, wobei der Freibord bei Deichhöhen bis 2,5 m mindestens 0,5 m betragen sollte, bei Deichhöhen von 5,0 m und größer 1,0 m (DVWK 1986).

2.4.3 Berücksichtigung der Klimaänderung

Zusätzlich zu den oben genannten Verfahren zur Bestimmung des Bemessungshochwasserstandes wird neuerdings teilweise ein Lastfall „Klimaänderung“ berücksichtigt. Mit dem Einfluß der Klimaänderung auf eine mögliche Änderung der Häufigkeiten von extremen Niederschlagsereignissen wird bei den verschiedenen zuständigen Landesbehörden sehr unterschiedlich umgegangen. Teilweise wird auf den berechneten Bemessungshochwasserstand eine pauschale Erhöhung zugerechnet, oder aber es wird mit einem Klimaänderungsfaktor multipliziert. Bei der Bemessung von Seezeichen wird in Schleswig-Holstein zum Beispiel auf die aktuelle Bemessungshöhe pauschal ein Zuschlag von 50 cm aufgeschlagen, der den erwarteten globalen Meeresspiegelanstieg in den nächsten 100 Jahren unter Berücksichtigung der Prognosen einer Klimaänderung des *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* beinhaltet (MLR 2001). In Baden-Württemberg wird für die Bestimmung des Bemessungsabflusses der Klimaänderungsfaktor $f_{T,K}$ eingeführt. Dieser ändert sich mit dem Wiederkehrintervall T_n des Hochwasserereignisses und ist zudem regional unterschiedlich groß (LfU 2006). Die lokal verschiedenen Klimaänderungsfaktoren für Baden-Württemberg sind in Tabelle 2-1 für Hochwasserereignisse mit unterschiedlichen Wiederkehrintervallen aufgeführt. In Abbildung 2-7 sind die Geltungsbereiche der verschiedenen Klimaänderungsfaktoren farblich gekennzeichnet.

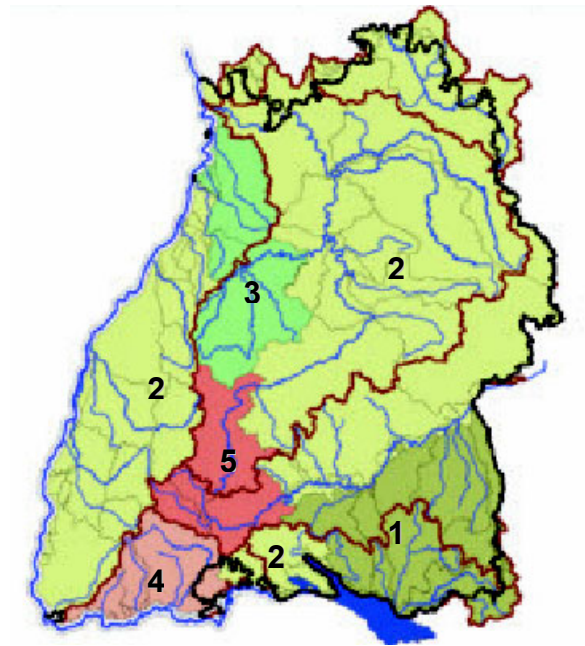


Abbildung 2-7: Regionen in Baden-Württemberg mit einheitlichen Klimaänderungsfaktoren (LfU 2005)

Tabelle 2-1: Klimaänderungsfaktoren in Baden-Württemberg (LfU 2005)

T_n [Jahre]	Regionale Klimaänderungsfaktoren $f_{T,K}$				
	1	2	3	4	5
2	1,25	1,50	1,75	1,50	1,75
5	1,24	1,45	1,65	1,45	1,67
10	1,23	1,40	1,55	1,43	1,60
20	1,21	1,33	1,42	1,40	1,50
50	1,18	1,23	1,25	1,31	1,35
100	1,15	1,15	1,15	1,25	1,25
200	1,12	1,08	1,07	1,18	1,15
500	1,06	1,03	1,00	1,08	1,05
1000	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Bemerkung: Für Jährlichkeiten $T_n > 1000$ a ist der Faktor $f_{T,K}$ gleich 1,00					

Der zuvor berechnete Hochwasserabfluß HQ_{Tn} erhöht sich bei der Berücksichtigung des Lastfalls Klimaänderung durch Multiplikation mit dem Faktor $f_{T,K}$:

$$HQ_{Tn,K} = f_{T,K} \cdot HQ_{Tn} \quad (1)$$

Bemerkenswert ist hierbei, daß mit zunehmenden Jährlichkeiten der Klimaänderungsfaktor immer kleiner wird und gegen eins geht. Dies bedeutet, daß die Klima-

änderung auf sehr selten auftretende und somit extreme Hochwasserereignisse keinen Einfluß hat.

2.4.4 Konsequenzen für die erforderliche Deichhöhe

Der Entscheidung für die Wahl eines bestimmten Bemessungshochwassers, das die Grundlage für die erforderlichen Deichhöhen darstellt, wird wie oben beschrieben zunächst von wirtschaftlichen Überlegungen beeinflusst. Wenn man jedoch bedenkt, daß die auf einer Datengrundlage von deutlich unter 100 Jahren beruhende statistische Berechnung von Niederschlagsereignissen und Abflüssen mit bestimmten Wiederkehrintervallen mit zahlreichen Ungenauigkeiten verbunden ist, und die Zuordnung von Hochwasserabflüssen zu Wasserständen durch die Überflutung von Vorländern und den Rückstau an Bauwerken weitere Ungenauigkeiten beinhaltet, erscheint diese gängige Praxis der Bemessung sehr fragwürdig. Von Experten wird zunehmend gefordert, von der Bemessung auf Grundlage von Jährlichkeiten Abstand zu nehmen (z.B. in einer Expertendiskussionsrunde im Rahmen des RIMAX-Statusseminars in Potsdam, März 2007).

3 Motivation – Sanierungsbedarf an Flußdeichen in Deutschland

Ein großer Teil der Flußdeiche an Gewässern erster Ordnung in Deutschland bietet momentan keinen ausreichenden Schutz vor schweren Hochwasserereignissen. Im Abschlußbericht zum „Hochwasser 2002 im Land Sachsen-Anhalt“ des Innenministeriums wurde festgestellt, daß bereits vor August 2002 der Zustand der Deiche in Sachsen-Anhalt besorgniserregend gewesen sei. Hier befindet sich etwa die Hälfte aller Elbdeiche. Über 80 % der Elbdeiche waren dem Bericht zufolge bereits vor den Hochwasserereignissen sanierungsbedürftig.

Auch das westlich von Darmstadt gelegene „Hessische Ried“ gilt als besonders hochwassergefährdet. Nach einer Studie des Hessischen Ministeriums des Innern und für Sport in Zusammenarbeit mit dem Landesbeirat für Brandschutz, Allgemeine Hilfe und Katastrophenschutz vom Oktober 2000 muß eine extreme Hochwasserlage des Rheins im Hessischen Ried als die für Hessen derzeit schlimmste denkbare Naturkatastrophe angesehen werden. Im Extremfall wäre neben massiven Schäden an Gebäuden, Infrastruktur und Versorgungseinrichtungen bei Deichbrüchen mit der Gefährdung einer Vielzahl von Menschen und Tieren zu rechnen, solange die vorgesehenen Sanierungsmaßnahmen nicht abgeschlossen sind. Dem Regierungspräsidium Darmstadt zufolge wären bei einem Versagen der Deiche an Rhein und Main während eines extremen Hochwasserereignisses auf einer Fläche von etwa 400 Quadratkilometern ca. 600.000 Menschen betroffen, was etwa zehn Prozent der hessischen Bevölkerung entspricht (Zwach 2003). Die hierdurch auftretenden Schäden würden sich auf mehr als 5 Mrd. Euro belaufen. Außerdem liegen in diesem potentiellen Überflutungsgebiet neben zahlreichen Industriebetrieben ein Atomkraftwerk und eine Sondermüllverbrennungsanlage, deren Überschwemmung katastrophale Umweltschäden zur Folge hätte.

In einem Sanierungsprogramm, das bis 2016 abgeschlossen sein soll, werden daher momentan die hessischen Rhein- und Mainwinterdeiche mit einer Gesamtlänge von rund 120 km saniert und auf einen 200-jährlichen Hochwasserschutz ausgebaut. Diese Sanierungsmaßnahmen kosten jährlich etwa 10 Millionen Euro. Bei außergewöhnlichen, extremen Hochwasserereignissen ist jedoch mit einer deutlichen Überschreitung der Bemessungswasserstände und somit mit der Überströmung der Deiche zu rechnen. Dies erhöht die Gefahr von Deichbrüchen enorm, da Deiche in der Regel einer länger andauernden Überströmung nicht standhalten. Während bei Überströmung von Deichen ohne folgendes Deichversagen respektive Breschenbildung lediglich der Scheitelabfluß der Hochwasserwelle ins Deichhinterland gelangen würde, hätten Deichbrüche das „Volllaufen“ der tiefer liegenden Regionen zur Folge. Letzteres wäre mit einem vielfachen Schadensausmaß verbunden.

Möglichkeiten zur Optimierung von Sanierungsmaßnahmen an Flußdeichen

3 Motivation – Sanierungsbedarf an Flußdeichen in Deutschland

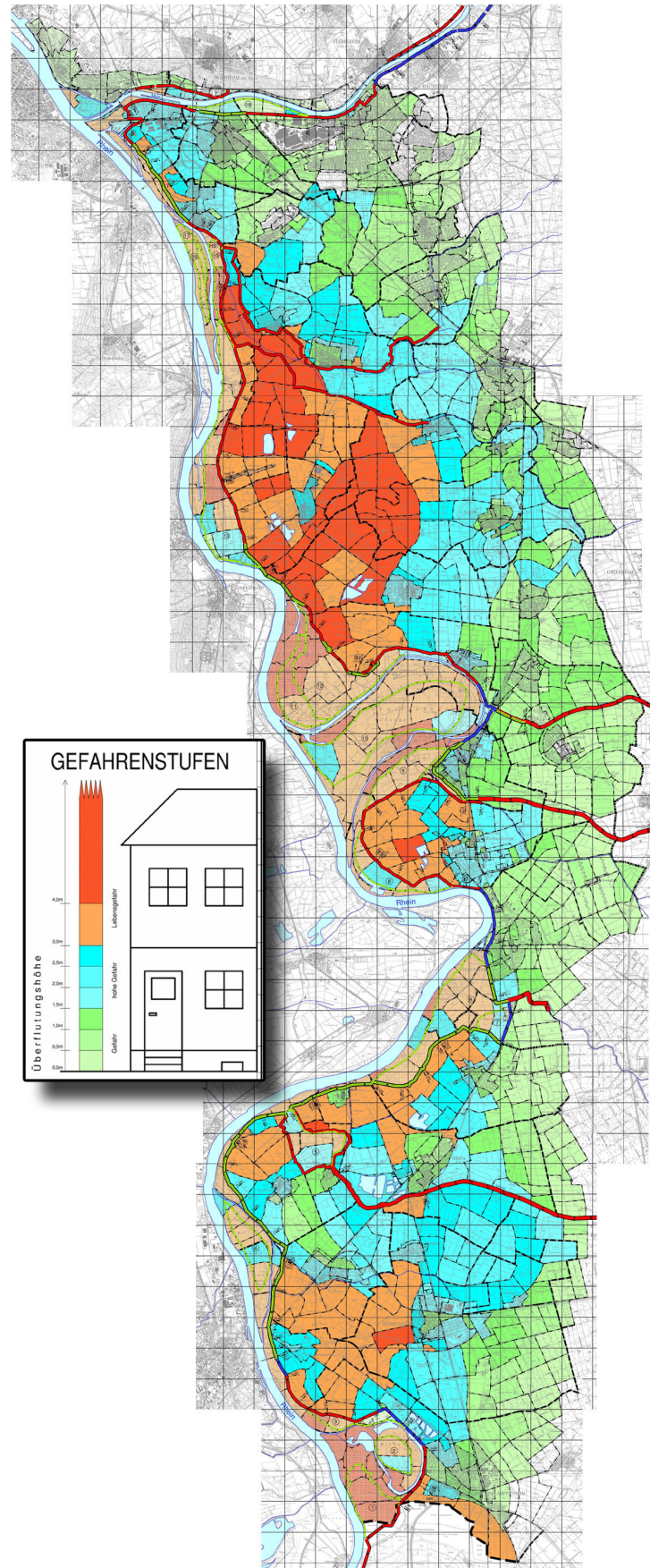


Abbildung 3-1: Hochwassergefahrenkarte des Rheins für Hessen

Abbildung 3-1 zeigt die vom Regierungspräsidium Darmstadt erstellte Hochwassergefahrenkarte von Rhein und Main, in der die Wasserstände über Geländenniveau dargestellt sind, die bei einem Deichversagen während eines 200-jährlichen Hochwasserereignisses, was dem Bemessungshochwasser (BHW) entspricht, auftreten würden. Man erkennt, das Teile des Rieds über vier Meter überstaut wären.

Als Bewertungskriterien für den Zustand von Deichen gelten in erster Linie deren Standsicherheit und Höhe. Bei den oftmals über einhundert Jahre alten Deichen sind beide Kriterien hinsichtlich der Hochwassersicherheit in der Regel nicht zufriedenstellend: Durch Wühltierbefall, Bewuchs, Setzungen oder das Befahren der Deichkrone, um nur einige mögliche Schadensursachen zu nennen, kann die Standsicherheit der Deichböschungen und die Dichtfunktion des Deichkörpers stark gefährdet sein. Zudem wurden in der Vergangenheit die Deiche in der Regel auf geringere Hochwasserjährllichkeiten bemessen. Bisher war das Bemessungshochwasser meistens ein einhundertjährliches Ereignis, wogegen heute immer häufiger ein zweihundertjährliches Wiederkehrintervall zugrunde gelegt wird.

Der Überströmungssicherheit von Flußdeichen wird bei der Bewertung des Zustands von bestehenden Deichen jedoch nach wie vor kein großer Stellenwert zugeordnet. Obwohl das Überströmen eines nicht zusätzlich gesicherten Deichs in der Regel zu starken Böschungserosionen bis hin zum kompletten Deichbruch bzw. zur Breschenbildung führt, wird bei Deichen, die auf das Bemessungshochwasser ausgebaut sind, auf eine zusätzliche Oberflächensicherung durch Deckwerke üblicherweise verzichtet. Eine generelle Verbesserung der Erosionsresistenz erscheint jedoch durchaus sinnvoll, da so beim Überschreiten der Bemessungswasserstände lediglich während des Durchlaufens des Hochwasserscheitels der Deich überströmt wird. Sind die Deiche hingegen nicht erosionssicher, führt ein eventuell folgender Deichbruch zur andauernden Flutung des Deichhinterlandes, so lange die Wasserstände im Vorfluter über Geländenniveau liegen. Speziell Bereiche, in denen ein geringes Schadenspotential im Deichhinterland vorhanden ist, könnten so als zusätzliche Polderflächen aktiviert werden, die nur bei extremen Hochwasserereignissen oberhalb des Bemessungshochwassers geflutet würden.

Bei den aktuell anfallenden Sanierungsmaßnahmen sollte daher die Erosionsresistenz der Deiche bei Überströmung durch konstruktive Maßnahmen verbessert werden. Um die Kosten der Sanierungsmaßnahmen bei maximaler Effektivität möglichst gering zu halten, sind innovative Alternativen zu den herkömmlichen Sanierungsverfahren gefragt.

4 Gängige Sanierungsmaßnahmen

Um die bestehenden Deiche dem Stand der Technik anzupassen und sie für extremere Hochwasserereignisse zu bemessen, müssen große Abschnitte der Deichlinien saniert werden. Neben der Erhöhung und Verbreiterung vorhandener Deiche ist manchmal ein kompletter Neubau von Deichen erforderlich. Anlaß für eine Deichsanie rung ist außer einer zu geringen Höhe und Breite oder zu steiler Böschungen die Beschaffenheit des Deichs: Häufig sind alte Deiche mit Bäumen bewachsen oder es befinden sich Bäume in unmittelbarer Nähe der Deichböschungen, so daß der Deichkörper komplett oder teilweise durchwurzelt ist. Dies birgt die Gefahr der Ausbildung von Stromröhren im Hochwasserfall. Besonders kritisch sind verrottende Wurzeln nicht entfernter Wurzelstöcke von gefälltten Bäumen, die bevorzugte Sickerwege darstellen. Auch die von Wühltieren in den Deichkörper gegrabenen Höhlen und Gänge stellen einen potentiellen Sickerweg dar und müssen daher beseitigt bzw. verfüllt werden. Ergeben geotechnische Erkundungen einen inhomogenen Aufbau, der durch Fehlstellen oder Sandlagen eine schlechte Dichtwirkung des Deichs vermuten läßt, muß der Deichkörper unter Umständen komplett erneuert werden.

Bei der Wahl der Sanierungsmaßnahmen spielen zudem die räumlichen Gegebenheiten eine entscheidende Rolle. Aufgrund zu naher Bebauung können bestehende Deiche gelegentlich nicht gemäß dem vorgesehenen Regelquerschnitt verbreitert werden, so daß die Bemessungshöhe nur durch alternative Maßnahmen zu erreichen ist, wenn eine Böschungsneigung von 1:3, wie sie in DIN 19712 empfohlen wird, nicht deutlich überschritten werden soll. Hier kommen als Sanierungsverfahren in der Regel Dichtwände, wie Spund-, Schlitz oder Rüttelschmalwände, zum Einsatz.

Art und Umfang der Sanierungsmaßnahmen richten sich nach der Beschaffenheit bzw. dem momentanen Zustand des Deichabschnitts und den örtlichen Gegebenheiten. Hier spielen sowohl der Deichuntergrund, als auch die Randbedingungen, wie angrenzende Bebauung und Infrastruktur, eine zentrale Rolle.

Ist die Dichtwirkung eines bestehenden Altdeichs voll funktionsfähig – das heißt, es sind keine Fehlstellen im Deich vorhanden – und ist das Sanierungsziel eine Deicherhöhung mit einhergehender Verbreiterung sowie das Anlegen eines Deichverteidigungswegs, wird der Deich in der Regel zunächst auf der Binnenseite verbreitert. Hierzu wird der aus Lehm bestehende homogene Deichkörper auf der landseitigen Böschung abgetreppt, um einen guten Anschluß an die Erweiterung zu gewährleisten. Als Baustoff für die Verbreiterung des Deichs wird im allgemeinen Kiessand verwendet, da unbedingt auf eine höhere Wasserdurchlässigkeit des Deichs zur Landseite hin zu achten ist, um einen möglichen Rückstau des Sickerwassers im Deichkörper zu vermeiden.

Möglichkeiten zur Optimierung von Sanierungsmaßnahmen an Flußdeichen

4 Gängige Sanierungsmaßnahmen

In Abbildung 4-1 ist ein homogener, nicht ausgebauter Deich und in Abbildung 4-2 ein Regelquerschnitt zum Deichausbau am hessischen Rhein dargestellt.

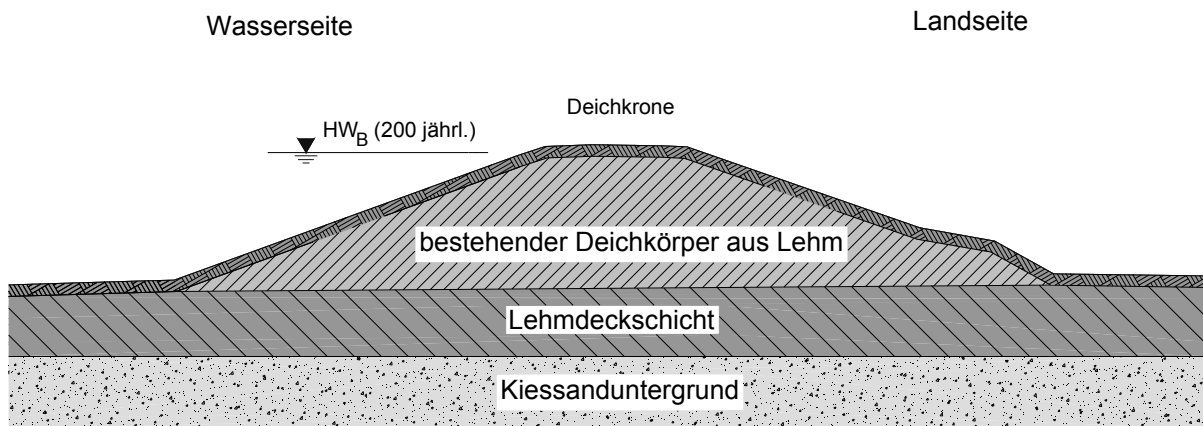


Abbildung 4-1: Homogener, nicht ausgebauter Deich

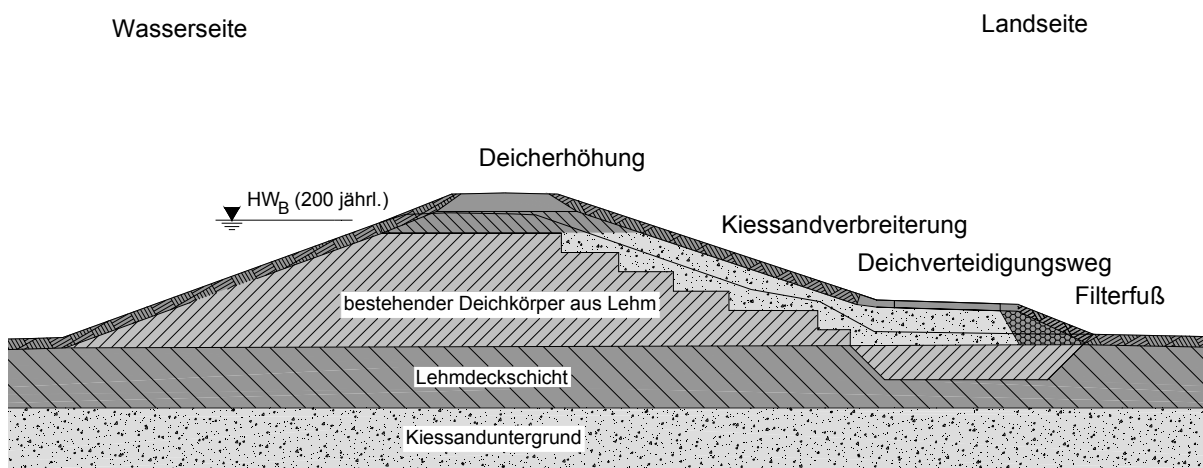


Abbildung 4-2: Regelquerschnitt des Deichausbaus am Rhein

Die Erhöhung des Deiches erfolgt mit bindigem Material, um eine gute Dichtwirkung zu erzielen. Unter der etwa 30 cm starken Mutterbodenabdeckung wird häufig eine Lage Splitt eingebaut, die als Wühltierschutz dient.

Der Deichverteidigungsweg wird beim Deich mit Regelprofil am hessischen Rhein auf dem aus Kiessand bestehenden Dränkörper in Ortbetonbauweise erstellt. Der Filterfuß besteht aus gut wasserdurchlässigem Porenbeton.

In Abbildung 4-3 sind die verschiedenen Arbeitsschritte einer Deichsanierung am hessischen Rhein dargestellt. Man erkennt die Abtreppung, den Einbau von Kiessand zur Verbreiterung der Böschung und als Dränkörper, den Einbau des Wühltierschutzes, das Aufbringen des Mutterbodens, den Bau des Deichverteidigungswegs

Möglichkeiten zur Optimierung von Sanierungsmaßnahmen an Flußdeichen

4 Gängige Sanierungsmaßnahmen

aus bewehrtem Beton sowie den Fußfilter aus Porenbeton (von links oben nach rechts unten).



Abbildung 4-3: Arbeitsschritte einer Standardsanierung an Rheinwinterdeichen

Muß aufgrund schlechter Untergrundverhältnisse oder bei zu geringer Dichtungswirkung des bestehenden Deichs (z.B. wegen vorhandener Fehlstellen oder zu hohem Sandanteil) von der oben beschriebenen Standardsanierung abgewichen werden, ist eine zusätzliche Dicht- oder Sperrwand in den Deichquerschnitt zu integrieren.

In Abbildung 4-4 ist ein Regelquerschnitt des Deichausbaus am hessischen Rhein mit landseitiger Sperrwand, die das Unterströmen des Deichs und die damit verbundene Gefahr des hydraulischen Grundbruchs und der rückschreitenden Erosion verhindern soll, dargestellt.

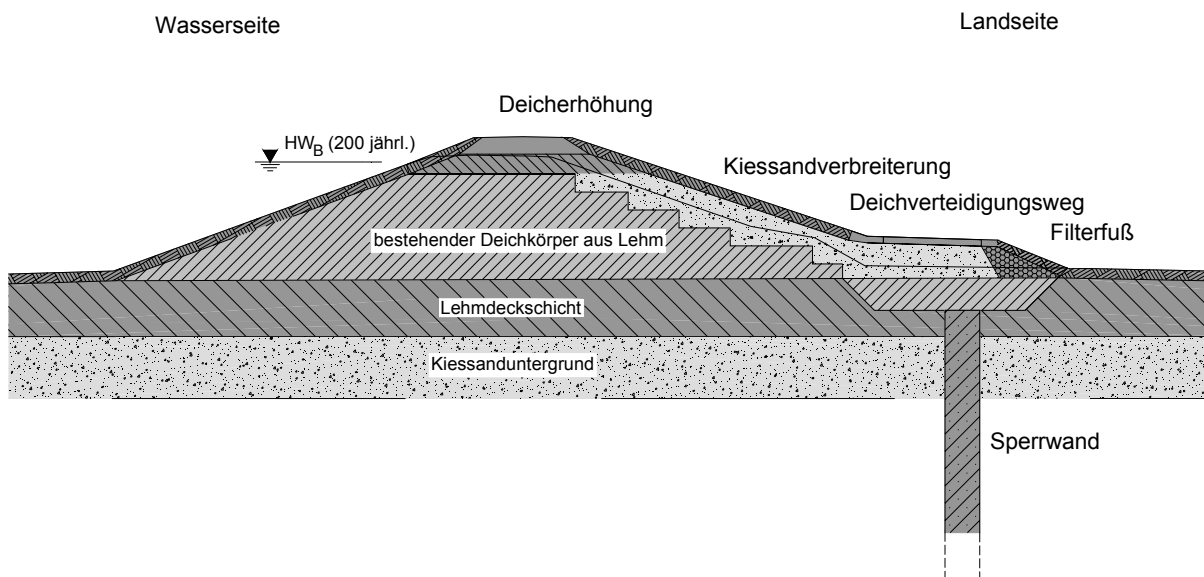
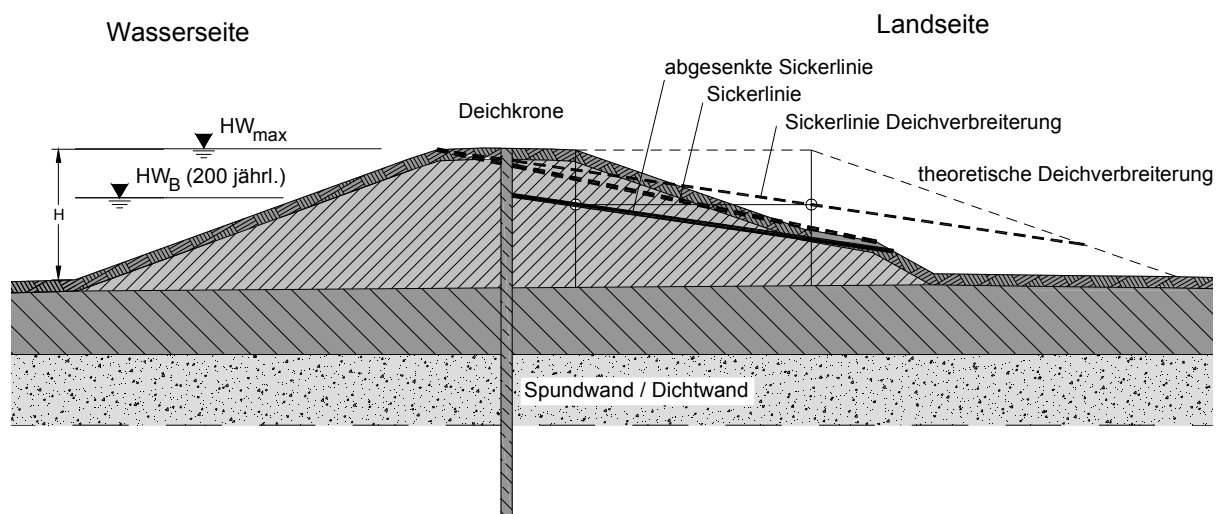


Abbildung 4-4: Regelquerschnitt des Deichausbaus am Rhein mit Sperrwand

4 Gängige Sanierungsmaßnahmen

Steht für eine Verbreiterung des Deichs nicht genügend Platz zur Verfügung, muß neben der Erhöhung der Deichkrone die Sickerlinie durch eine Spund- oder Dichtwand abgesenkt werden, wie in Abbildung 4-6 dargestellt.



20

5 Untersuchungen zur Entwicklung neuartiger Sanierungsverfahren

Eine Deichsanierung zielt in der Regel darauf ab, den ursprünglichen Zustand eines beschädigten Deichs wiederherzustellen bzw. durch Aufhöhung einen höheren Schutzgrad zu gewährleisten. Da derartige Baumaßnahmen häufig sehr aufwendig und kostenintensiv sind, sollten nach Möglichkeit Aspekte zur Optimierung der Sanierung berücksichtigt werden.

In der Regel sind für Baumaßnahmen zur Sanierung und zum Neubau von Deichen große Mengen an Erdbaustoffen mit charakteristischen bodenphysikalischen und umweltrelevanten Eigenschaften erforderlich, wobei diese Eigenschaften im wesentlichen von der Funktion des Bauteils (Dichtung, Stützkörper), in dem sie verwendet werden, abhängen. Üblicherweise werden hierzu natürliche mineralische Baustoffe wie Ton, Schluff, Sand, Kies oder Steine verwendet. Die bindigen Materialien werden für die Dichtung und die nichtbindigen als Stütz- und Filterkörper eingesetzt. Da diese natürlichen Rohstoffe aufgrund der großen Längserstreckung der Deichbauwerke zumeist in sehr großen Mengen benötigt werden, stellt die regionale Verfügbarkeit derartiger Baustoffe ein immer größer werdendes Problem dar. Um Transportkosten, die einen großen Kostenanteil der Baumaßnahme ausmachen können, möglichst gering zu halten, ist man jedoch bemüht, die Baustoffe entweder aus Abbaubetrieben (Ton-, Sand- und Kiesgruben) in der Nähe der Baumaßnahme zu beziehen oder, wenn möglich, neue Entnahmestellen zu erschließen.

Die Anforderungen an derartige Erdbaustoffe regelt die DIN 19712 „Flußdeiche“. Sie fordert u. a., daß geeignete Materialien beständig sein müssen, sich nicht zersetzen oder auflösen dürfen und keine stärker quellenden oder brennbaren Bestandteile enthalten dürfen. Ferner müssen sie bestimmte Anforderungen hinsichtlich ihrer Durchlässigkeit, Verdichtungsfähigkeit, Scherfestigkeit und Filterstabilität erfüllen.

Vor der Inbetriebnahme einer neuen Abbaustelle müssen zudem Untersuchungen zur Umweltverträglichkeit durchgeführt werden und geeignete Rekultivierungsmaßnahmen zur Erhaltung des natürlichen Landschaftsbildes geplant werden.

In der DIN 19712 werden als Baustoffe für den Deichbau neben natürlichen Materialien auch künstlich hergestellte Baustoffe als prinzipiell geeignet angesehen. Der Einsatz von solchen Sekundärrohstoffen im Deichbau würde einen wichtigen Beitrag zur Schonung der wertvollen natürlichen Ressourcen leisten und könnte unter Umständen die Materialkosten deutlich reduzieren.

Ein weiterer Aspekt, den es bei der Sanierung von Flußdeichen zu beachten gilt, ist die potentielle Gefahr von Deichüberströmungen bei der Überschreitung der Bemessungswasserstände während extremer Hochwasserereignisse.

Die Erosionsanfälligkeit von Deichböschungen und Erddämmen in herkömmlicher Bauweise ist bei Überströmungen generell problematisch, da in der Regel große Strömungsgeschwindigkeiten und Sohlschubspannungen auftreten. In den meisten Fällen führt die Überströmung der ungesicherten Deich- oder Dammkrone zum kompletten Versagen des Bauwerks durch Erosion. Bei vordefinierten Überlaufstrecken, wie einer Hochwasserentlastung über eine Dammkrone, wird daher ein entsprechender Teil der Böschung oftmals durch Pflasterungen oder durch Beton gesichert. Derartige Maßnahmen sind jedoch bei Flußdeichen aufgrund deren großer Länge nicht sinnvoll. Zudem kann eine solche Sicherung der landseitigen Böschung zu deren Versiegelung führen und ist daher im Deichbau nicht geeignet. Eine Alternative Maßnahme zur Erhöhung der Erosionssicherheit von Deichböschungen stellt die Verwendung von Geokunststoffen als Stabilisierung der Oberfläche bzw. als Deckwerk dar.

In den beiden folgenden Abschnitten wird auf die Möglichkeit der Verwendung von Recyclingmaterial als Baustoff im Stützkörper (5.1), sowie auf die konstruktive Verbesserung der Erosionssicherheit von Deichen bei Überströmung (5.2) eingegangen. Die hierzu durchgeführten Untersuchungen erfolgten im Rahmen von Forschungsvorhaben, die durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) und das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wurden.

5.1 Naturmaßstäbliche Untersuchungen zur Verwendung von Recyclingmaterial als Baustoff im Stützkörper

Um die hochwertigen, nicht regenerativen Vorräte an natürlichen Erdbaustoffen zu schonen und zudem Kosten zu sparen, liegt die Verwendung von alternativen Baustoffen im Deichbau, insbesondere für den Deichkern, nahe. Prinzipiell ist der Einsatz von künstlichen Baustoffen für den Deichbau nach DIN 19712 „Flußdeiche“ erlaubt. Hier heißt es dazu wörtlich: *„Geeignet sind auch künstlich hergestellte Schüttmaterialien. Hierzu gehören nichtbindige Materialien wie Hochofenschlacke, granuliert Schlacke, Asche und Flugasche und recycleter Bauschutt, ferner die mehr oder weniger bindigen Materialien wie Schlackensand und mineralische Klärrückstände (DIN 19712, 1997, S. 19).“* Die Eignung ist dabei abhängig von den strömungsmechanischen, bodenmechanischen, chemischen und biologischen Eigenschaften der Sekundärrohstoffe.

Als alternative Deichbaustoffe kommen den Richtlinien für die Güteüberwachung von Mineralstoffen im Straßenbau (RG Min-StB 93) entsprechende Baustoffrecycling-Materialien (Bauschutt) in Frage, die im Straßenbau bereits seit Jahrzehnten erfolgreich z. B. als Frostschutzschichten, Tragschichten oder für Lärmschutzwälle eingesetzt werden und deren Aufkommen sich gegenwärtig auf ca. 300 Mio. Tonnen pro Jahr beläuft. Auch die Verwendung von Hausmüllverbrennungsschlacken (HMV-Schlacken), die bei einem Einsatz im Bereich des Straßenbaus nach RG Min-StB 93 ebenfalls einer bautechnischen und umweltrelevanten Güteüberwachung unterliegen müssen, eignen sich aufgrund ihrer günstigen bodenphysikalischen Eigenschaften für den Einsatz als Kernmaterial im Deichbau. Davon fallen gegenwärtig ca. 3 Mio. Tonnen pro Jahr an, die Tendenz ist steigend. Es werden heute ca. 60 % der Gesamtmenge an HMV-Schlacken in ungebundener oder hydraulisch gebundener Form als Baumaterial im Straßenbau verwendet.

Der Untersuchungsaufwand güteüberwachter Recyclingmaterialien ist in der Regel geringer als bei natürlichen Erdstoffen aus einer neuen Abbaustelle, da aufgrund der regelmäßigen bautechnischen und umweltrelevanten Güteüberwachung bei RC-Materialien definierte und kontrollierte Eigenschaften vorliegen. Hinzu kommt die Reduzierung der Baukosten durch den günstigeren Preis der Recyclingbaustoffe.

In Tabelle 5-1 sind gängige Marktpreise von natürlichen Baustoffen und Recyclingmaterialien gegenübergestellt (Az: 18063).

Tabelle 5-1: Kostenvergleich natürlicher und recycelter Baustoffe

		Preis pro Tonne in EUR
Natürliches Material	Ton	3,50
	Sand	4,- bis 5,-
	Kies	6,- bis 7,-
	Natursteine	> 7,-
RC-Material	Bauschutt-Recyclingmaterial	1,50 bis 3,50
	Mineralgemische	2,- bis 3,-
	Frostschutz, güteüberwacht	4,-
	Müllverbrennungsschlacke	1,50

Die positiven bautechnischen und umweltrelevanten Eigenschaften der genannten Recycling-Materialien wurden sowohl in der Baupraxis bei der bisherigen Verwendung in Bereichen des Straßenbaus, als auch in Langzeitversuchen bestätigt (Pfrang-Stotz & Reichelt 1996 und 1999). Aufgrund fehlender Erfahrungen mit In-Situ-Versuchen im Bereich des Deichbaus wurden derartige alternative Baustoffe dort jedoch bisher nicht in nennenswertem Umfang eingesetzt.

Im Rahmen eines von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Forschungsvorhabens der TU Darmstadt und der Universität Karlsruhe (TH) wurden in Kooperation mit dem Land Hessen, vertreten durch das Regierungspräsidium Darmstadt, und zwei Firmen der Baustoffaufbereitungsbranche (Baustoffaufbereitung K&S GmbH, Büttelborn und Hermann Rauen GmbH & Co., Mannheim) Untersuchungen an einem Forschungsdeich im Naturmaßstab durchgeführt (Az: 18063). Die Versuche, bei denen langeinstauende Hochwasserereignisse simuliert wurden, konnten die Eignung von Recyclingmaterial als Baustoff für Flußdeiche sowohl aus Sicht der Standsicherheit und hydraulischen Funktionstüchtigkeit, als auch hinsichtlich der Umweltverträglichkeit nachweisen. Vorgehensweise und Ergebnisse der Untersuchungen sind im Folgenden zusammengestellt.

5.1.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsdeich befindet sich auf dem Gelände der Deichmeisterei in Biebesheim am Rhein im hessischen Ried. Der im Naturmaßstab errichtete Deich steht auf einer Freifläche und kann durch die wasser- und stirnseitige Umspundung eingestaut werden, um so naturähnliche Hochwasserereignisse zu simulieren.

Als Bauform wurde ein zonierter Deich mit wasserseitiger Tondichtung gewählt. Die zu untersuchenden Recyclingmaterialien wurden als Baustoff im Stützkörper verwendet. Der Deich mit einer Gesamtlänge von ca. 60 m ist in zwei gleich große Ab-

schnitte unterteilt. Sie sind durch eine ein Meter starke vertikal verlaufende Tondichtung voneinander hydraulisch getrennt. In einem Abschnitt wurde RC-Baustoff (bestehend aus Straßenaufbruch und Bauschutt), im anderen Müllverbrennungsschlacke (MV-Schlacke) als Baumaterial im Stützkörper verbaut. Am landseitigen Böschungsfuß befindet sich ein Dränkörper (Fußfilter) aus Kiessand. Zwischen Oberboden und Recyclingmaterial wurde der Deich im Bereich der Krone und der landseitigen Böschung mit einer ca. 40 cm starken Lehmschicht versehen, die das Infiltrieren von Niederschlagswasser in den Basiskörper unterbinden soll. Dies soll eine etwaige Vermischung des Sickerwassers mit Niederschlagswasser verhindern, was die Ergebnisse der Sickerwasseranalyse verfälschen würde. Die Deichbasis ist durch eine Kunststoffdichtungsbahn (KDB) abgedichtet, die an der Spundwand aufgekantet ist und bis zur Oberkante der Spundwandbohlen reicht, so daß Sickerwasserverluste in den Untergrund ausgeschlossen werden können. Das den Deichkörper durchdringende Sickerwasser wird für beide Abschnitte getrennt in Gräben und Sickerwasserschächten gefaßt. Somit kann sowohl die anfallende Sickerwassermenge bestimmt werden, als auch eine getrennte Beprobung und Analyse des Sickerwassers der beiden verwendeten Recyclingmaterialien erfolgen. Das für den Einstau benötigte Wasser wird einem Grundwasserbrunnen entnommen. Der Aufbau des Forschungsdeichs ist in Abbildung 5-1 schematisch dargestellt.

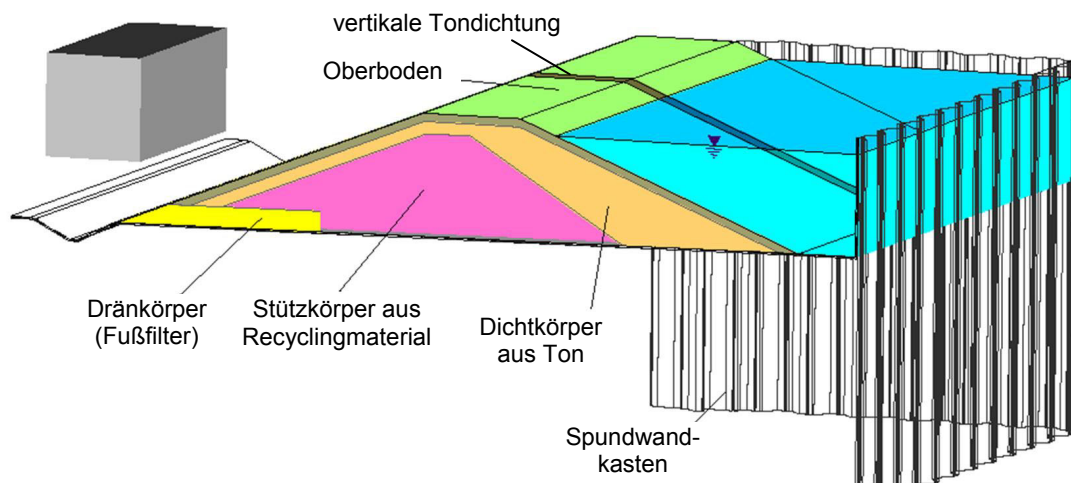


Abbildung 5-1: Aufbau des Forschungsdeichs, schematisch

Der Deich wurde in seinen Abmessungen und seiner Geometrie einem typischen Rheinwinterdeich im hessischen Ried nachempfunden: Er hat eine Höhe von 3 m und eine Breite von 17,5 m. Die Böschungsneigung beträgt 1:2,5. Der Querschnitt des Versuchsdeichs ist in Abbildung 5-2 dargestellt.

Möglichkeiten zur Optimierung von Sanierungsmaßnahmen an Flußdeichen

5 Untersuchungen zur Entwicklung neuartiger Sanierungsverfahren

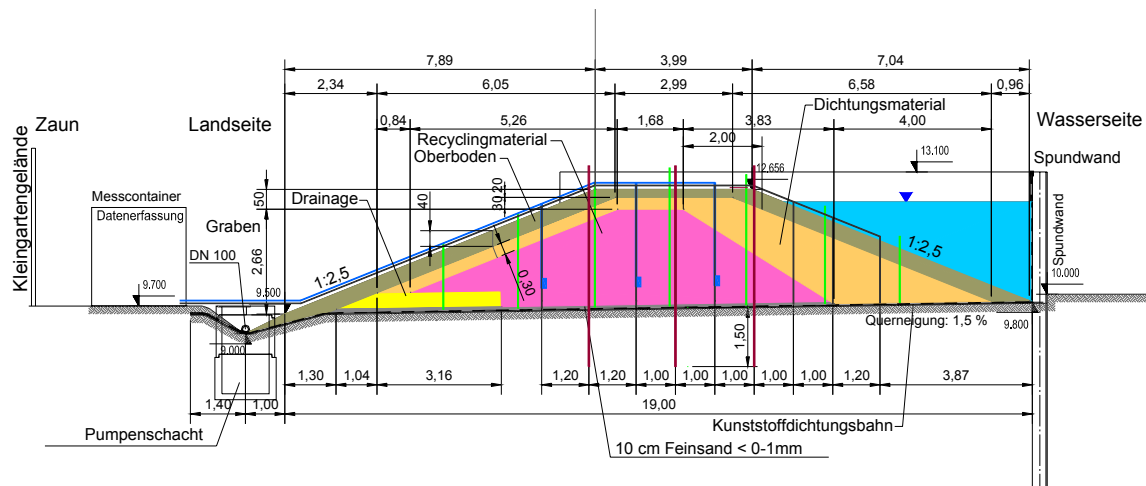


Abbildung 5-2: Querschnitt des Forschungsdeichs

Der Bau des Deichkörpers erfolgte lagenweise nach Fertigstellung des Spundwandkastens und Versiegelung der Deichaufstandsfläche mit der KDB. Abbildung 5-3 zeigt den Einbau der verschiedenen Baumaterialien und den mit KDB ausgekleideten Spundwandkasten zu Beginn der Baumaßnahme.



Abbildung 5-3: Einbau der verschiedenen Baumaterialien

5.1.2 Materialeigenschaften der Sekundärrohstoffe

Um das Einhalten der Güteanforderungen für die Verwendung von Sekundärrohstoffen als Baumaterialien sicherzustellen, sind eine regelmäßige Güteüberwachung und ein Eignungsnachweis durch ein anerkanntes Prüflabor erforderlich. Im Straßenbau werden die einzuhaltenden bautechnischen und umweltrelevanten Eigenschaften insbesondere durch die Technischen Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau (TL Min-StB 2000) und durch verschiedene Merkblätter der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) festgelegt. Außerdem sind umweltrelevante Anforderungen an Baustoffe in Heft 20 der Mitteilungen der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) festgelegt.

Die für den Bau des Forschungsdeichs verwendeten Sekundärrohstoffe stammen aus den Aufbereitungsanlagen der Firmen Rauen GmbH & Co. in Mannheim (MV-Schlacke) und K & S GmbH in Büttelborn (RC-Baustoff).

In der Aufbereitungsanlage der Firma Rauen wird durch mechanische Verfahren Müllverbrennungsrohschlacke zur Müllverbrennungsschlacke (MV-Schlacke) aufbereitet. MV-Schlacke besteht aus gesinterten und teilweise geschmolzenen Verbrennungsprodukten (Schlackeanteil), Glas, Keramik, Metallen, Gesteinen und Unverbranntem. Für die bautechnischen und umweltrelevanten Eigenschaften der MV-Schlacke sind die gesinterten Verbrennungsrückstände ausschlaggebend, die aus Mineralphasen mit unterschiedlichen charakteristischen chemischen und physikalischen Reaktionsmechanismen bestehen. Die Rohschlacke, die bei der Verbrennung von Siedlungsabfällen, Hausmüll und hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen in Hausmüllverbrennungsanlagen anfällt, wird bei der Aufbereitung durch Siebung in definierte Kornklassen (z.B. 0/16 mm, 0/22 mm, 0/32 mm) unterteilt und durch einen Metallabscheider von Metallen getrennt. Bevor die aufbereitete MV-Schlacke als Baumaterial verwendet werden darf, wird sie zur Verbesserung der Raumbeständigkeit für drei Monate in Form von Halden abgelagert, um Treiberscheinungen bzw. Volumenvergrößerungen in der Schlackematrix zu verhindern, die auf Mineralreaktionen zurückgehen. Die Hauptbestandteile von MV-Schlacken sind Silikate, Oxide und Carbonate. Außerdem treten amorphe Glasphasen, verschiedene Eisenminerale und Feldspäte, sowie Spuren von Metallen, Legierungen und die unterschiedlichsten Sulfate und Salze auf (Pfrang-Stotz & Reichelt 1996 und 1999).

Das im Forschungsdeich verwendete Baustoffrecyclingmaterial (RC-Baustoff) besteht aus Mineralstoffen, die bereits zuvor als natürliche oder künstliche mineralische Baustoffe in gebundener oder ungebundener Form eingesetzt waren. Typische Ausgangsmaterialien sind Straßenaufbruch und Bauschutt. In der Aufbereitungsanlage der Firma K & S werden die angelieferten Rohmaterialien zunächst in einem Bakenbrecher zerkleinert. Hier wird der Baustahl durch einen Magnetabscheider vom Beton abgesondert. Nichteisenmetalle, Kunststoffe, Holz und andere Störstoffe werden anschließend von Hand an einem speziellen Lesband aussortiert. Das abgesieb-

te Grobkorn wird in einem Prallbrecher nachträglich zerkleinert. Der so aufbereitete RC-Baustoff mit der Körnung 0/45 mm wird gemäß RG Min-StB güteüberwacht und auf den möglichen Einsatz als Baustoff im Straßenbau aus bautechnischer und umweltrelevanter Sicht begutachtet.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens (Az: 18063) wurden die beiden im Bereich des Stützkörpers verwendeten Recyclingmaterialien vom Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen (ISE) der Universität Karlsruhe (TH) beprobt. Die Probenahme erfolgte sowohl direkt bei den beiden Aufbereitungsunternehmen, als auch bei der Anlieferung der Baumaterialien auf der Deichbaustelle in Biebesheim vor Ort. Mit den Proben wurden am ISE bautechnische, mineralogische und umweltrelevante Untersuchungen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in den folgenden Abschnitten zusammengestellt.

5.1.2.1 Korngrößenverteilung

In Abbildung 5-4 ist die Korngrößenverteilung der beiden als Baustoff im Stützkörper des Versuchsdeichs verwendeten Recyclingmaterialien MV-Schlacke und RC-Baustoff dargestellt. Die Korngrößenverteilung ist für die Scherfestigkeit, die Durchlässigkeit und die Suffosionssicherheit des betrachteten Materials, sowie für die Filterstabilität zu den angrenzenden Materialien maßgebend.

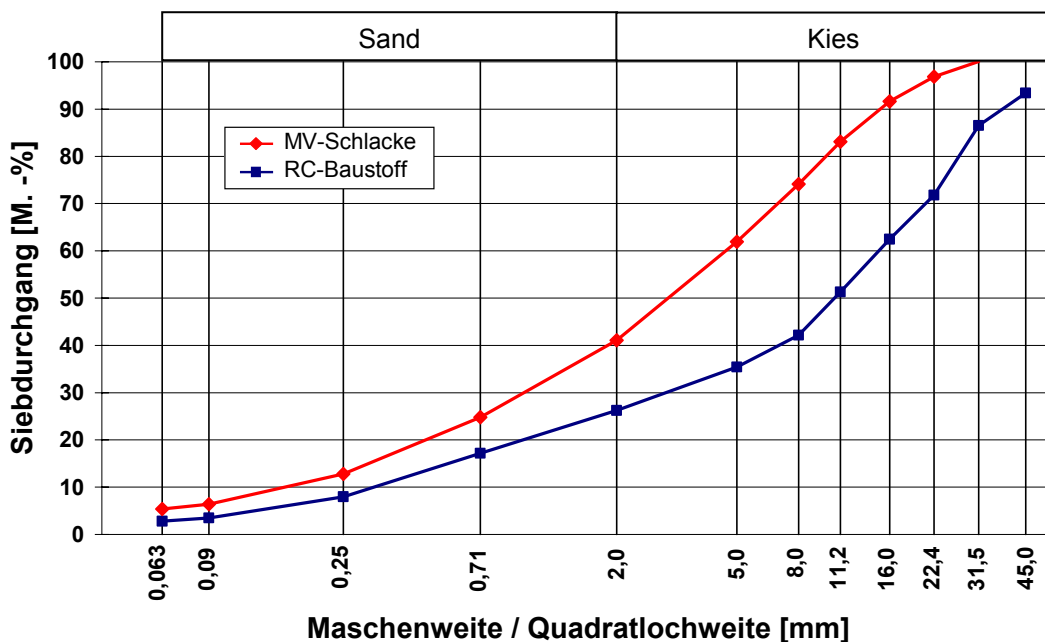


Abbildung 5-4: Korngrößenverteilung der Sekundärrohstoffe

5.1.2.2 Scherfestigkeit

Die Scherfestigkeit der verwendeten Baumaterialien ist im Deichbau von großer Bedeutung, da sie maßgeblich die Standsicherheit der Deichböschungen bestimmt. Sie wird in Scherversuchen (in der Regel Triaxialversuche nach DIN 18137) ermittelt und durch die Scherparameter Reibungswinkel φ und Kohäsion c ausgedrückt. Die Scherfestigkeit wird vorwiegend durch die Kornverteilung, Korngröße und Kornrauheit, sowie durch die Lagerungsdichte bestimmt.

Die in der Abbildung 5-5 dargestellten Ergebnisse der am Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe (TH) durchgeführten Scherversuche zeigen, daß beide Sekundärrohstoffe sehr gute Scherfestigkeiten aufweisen. Die ermittelten Reibungswinkel φ sind im Vergleich zu den Erfahrungswerten bei natürlichen Baustoffen wie Schotter (40°) und Sand (30° bis $37,5^\circ$) (EAU 1990) mit 45° bzw. 42° sehr hoch.

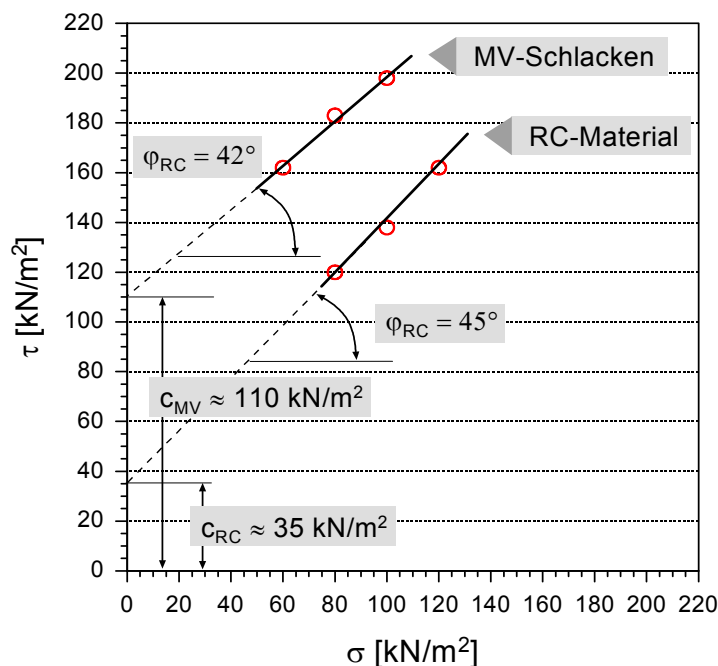


Abbildung 5-5: Scherfestigkeit der Sekundärrohstoffe

5.1.2.3 Proctordichte

Die Proctordichte ρ_{Pr} ist die größtmögliche Dichte, die ein Boden bei optimalem Wassergehalt bei vorgegebener Belastung erreichen kann. Sie wird im genormten Proctorversuch nach DIN 18127 bestimmt.

Abbildung 5-6 und Abbildung 5-7 zeigen die Ergebnisse der am ISE durchgeführten Proctorversuche.

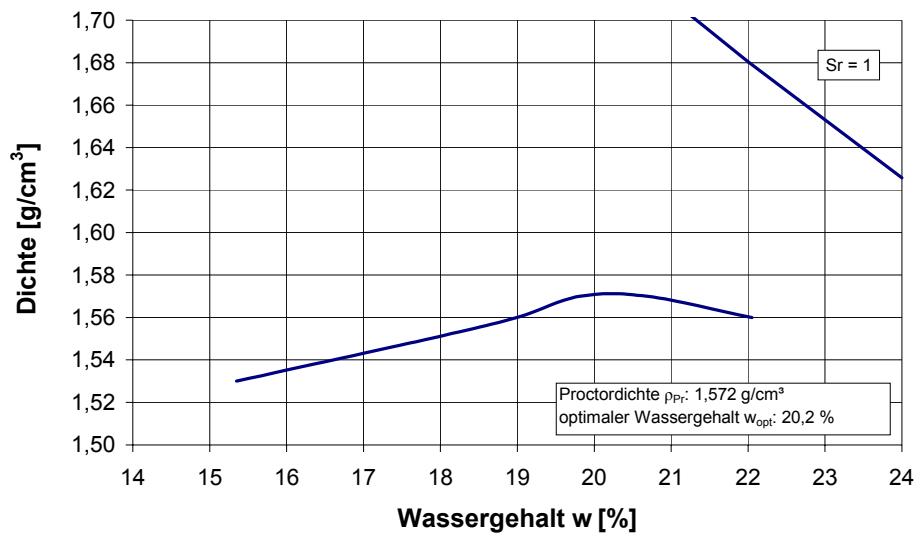


Abbildung 5-6: Ergebnis des Proctorversuchs der verwendeten MV-Schlacke

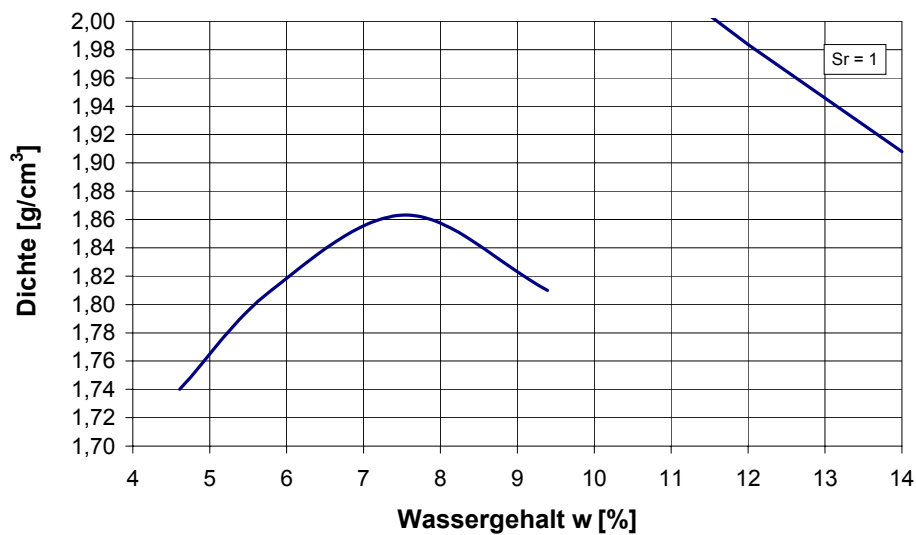


Abbildung 5-7: Ergebnis des Proctorversuchs des verwendeten RC-Baustoffs

5.1.2.4 Wasserdurchlässigkeit

Die Wasserdurchlässigkeit der verwendeten Baustoffe ist in Tabelle 5-2 zusammengestellt.

Tabelle 5-2: Durchlässigkeiten der verwendeten Baumaterialien

	Dichtungston	RC-Baustoff	MV-Schlacke
k_f -Wert [m/s]	$2,4 \times 10^{-9}$	$1,3 \times 10^{-4}$	$9,6 \times 10^{-5}$

5.1.2.5 Stoffliche Zusammensetzung

Die Bestandteile der als Baustoff im Stützkörper des Versuchsdeichs verwendeten Sekundärrohstoffe sind in Abbildung 5-8 und Abbildung 5-9 dargestellt.

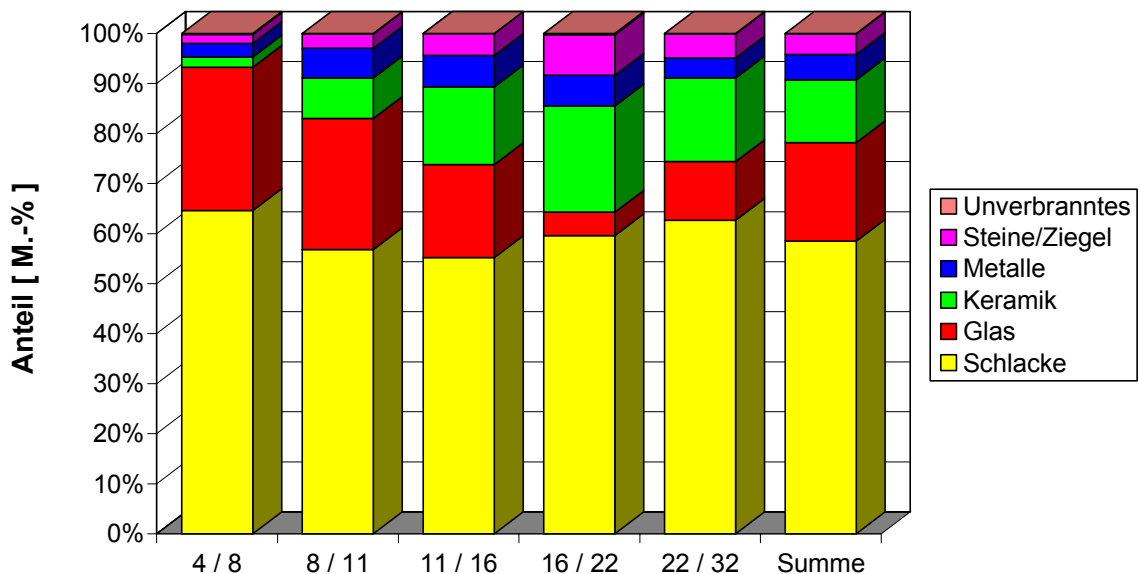


Abbildung 5-8: Stoffliche Zusammensetzung der verwendeten MV-Schlacke

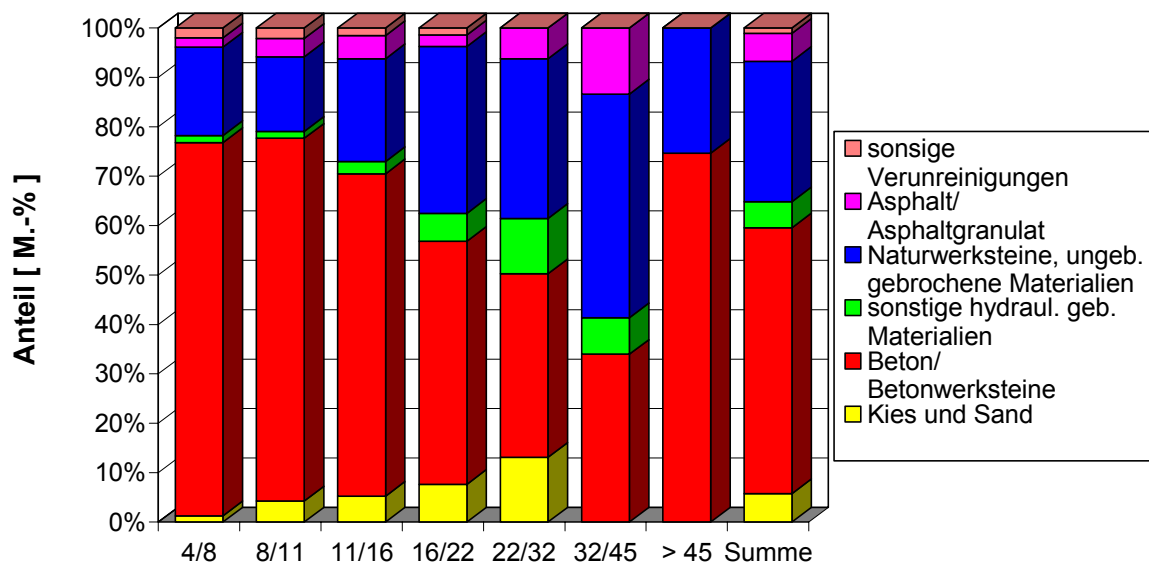


Abbildung 5-9: Stoffliche Zusammensetzung des verwendeten RC-Baustoffs

5.1.2.6 Umweltverträglichkeit

Am Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen (ISE) der Universität Karlsruhe (TH) wurden mit dem in Deutschland standardisierten sogenannten DEV S4-Test (DIN 38414, Teil 4), sowie durch die Ermittlung ausgewählter Feststoffgehalte die Umweltverträglichkeit der verwendeten Recyclingmaterialien untersucht. Die Bewertung erfolgte anhand der Zuordnungs- und Grenzwerte der LAGA und TL Min-StB 2000.

Die Ergebnisse der Eluatanalysen und Feststoffbestimmungen zeigten, daß die untersuchten Sekundärrohstoffe (MV-Schlacke und RC-Baustoff) hinsichtlich der Umweltverträglichkeit als Baustoff für den Deichbau geeignet sind (Az: 18063).

5.1.3 Meßeinrichtungen

Zur Beobachtung des Durchströmungs- und Verformungsverhaltens des Forschungsdeichs wurde dieser mit festinstallierter Meßtechnik bestückt. Diese ist in zwei Meßprofilen untergebracht, die sich jeweils in der Mitte der beiden Deichabschnitte mit den unterschiedlichen Recyclingmaterialien befinden. Auch die Randbedingungen, wie Niederschlag und Beckenwasserstand im Einstaubereich, wurden bei der Versuchsdurchführung elektronisch erfaßt. Die Beprobung des Sickerwassers zur Durchführung von Wasseranalysen erfolgte sowohl über die in den Meßprofilen installierten Sickerwasserpegel, als auch über die auf der Binnenseite des Deichs gelegenen Sammelschächte, um eine eventuelle Anreicherung des Sickerwassers mit umweltbelastenden Stoffen beim Durchströmen des Deichkörpers nachweisen zu können.

Im Einzelnen sind folgende Meßeinrichtungen im und am Deich integriert:

- Inklinometerrohre
- Feuchtemeßsystem
- Sickerwasserpegel (Wasserstand im Deichkörper, Probenahme)
- Temperatursonden
- Sickerwasser-Meßwehre
- verschiedene Wasserstandsmesser
- Niederschlagsmesser

Abbildung 5-10 zeigt die Instrumentierung des Versuchsdeichs. Zur Gegenüberstellung des Materialverhaltens bei Belastung durch den Staudruck und Durchsickerung während der Einstauversuche, sowie der hydraulischen bzw. statischen Eigenschaften der beiden verwendeten unterschiedlichen Stützkörperbaustoffe (RC-Baustoff und MV-Schlacke) sind beide Deichabschnitte mit jeweils identischen Meßprofilen ausgestattet. Die einstaubare Wasserseite befindet sich im oberen Bereich der Abbildung.

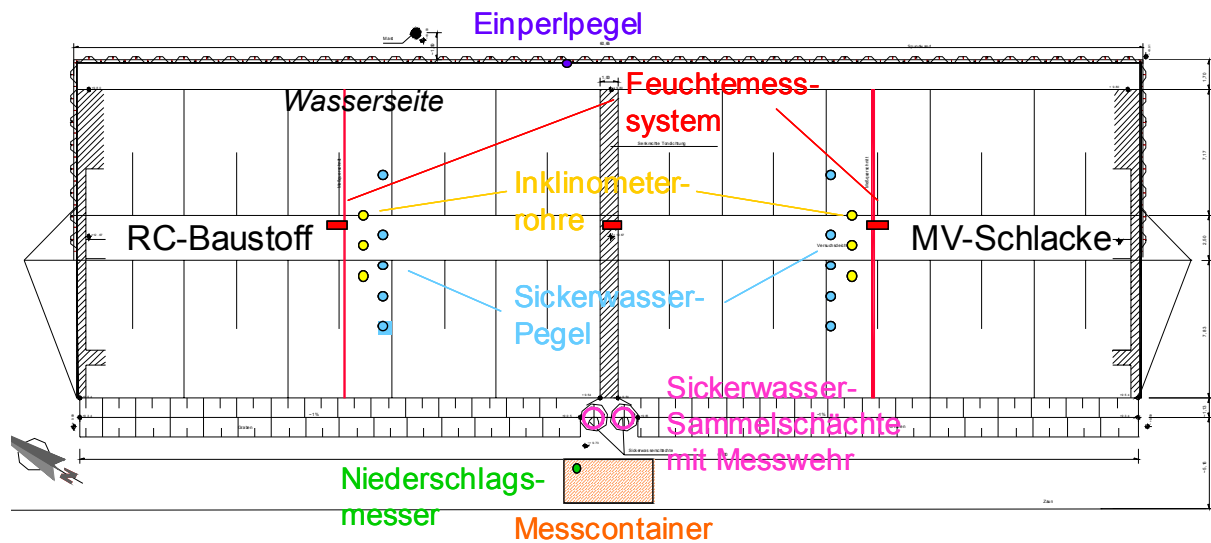


Abbildung 5-10: Instrumentierung des Forschungsdeichs, Draufsicht

Nachfolgend werden die verschiedenen Meßeinrichtungen kurz beschrieben.

▪ Inklinometer

Das Inklinometer-System besteht aus fest im Deichkörper installierten Meßrohren, der Inklinometer-Sonde und dem zugehörigen Datenerfassungsgerät.

Die vertikal stehenden Inklinometer-Meßrohre aus Kunststoff schließen durch gute Verdichtung unmittelbar an das sie umgebende Material an und können den räumlichen Verformungen des Deichkörpers ungehindert folgen. Sie enden ca. einen Meter unterhalb der Deichaufstandsfläche und sind durch die KDB hindurchgeführt, an die sie wasserdicht anschließen. Der Fußpunkt ist somit fixiert und dient als Referenz für die Verschiebungsmessungen. Pro Meßquerschnitt sind drei Inklinometer-Meßrohre installiert.

Die Inklinometersonde mißt die beiden horizontalen Komponenten (x und y) des Verschiebungsvektors entlang des vertikalen Inklinometer-Meßrohrs. Das Kabel der Sonde, an dem diese entlang der Meßstrecke geführt wird, ist mit Markierungen im Abstand von 0,5 m versehen. In diesen Abständen wird jeweils eine Messung durchgeführt. Eine unmittelbar vor Versuchsbeginn durchgeführte Referenzmessung wird den Meßergebnissen während des Versuchs gegenübergestellt, um die tatsächliche Verschiebung zu den entsprechenden Zeitpunkten zu erhalten. Abbildung 5-11 zeigt die Durchführung einer Inklinometermessung während eines Einstauversuchs.



Abbildung 5-11: Durchführung einer Inklinometermessung

Die Messungen erfolgten dabei in jeweils einem aus drei Meßstellen bestehenden Meßquerschnitt in beiden Deichabschnitten. Die Meßstellen im Bereich der MV-Schlacke als Stützkörperbaustoff haben die Bezeichnung „A“, im RC-Baustoff Abschnitt die Bezeichnung „B“ (s. Abbildung 5-12). Die jeweils drei hintereinander liegenden Inklinometermeßstellen sind von der Wasserseite beginnend durchnummeriert.

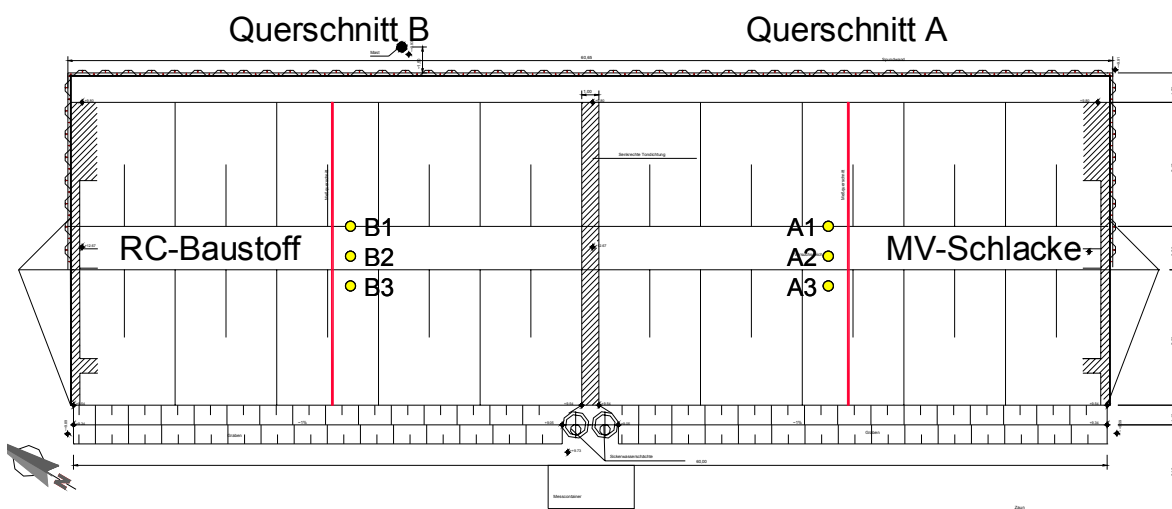


Abbildung 5-12: Lage der Inklinometermeßstellen, Draufsicht

Die gemessenen Verschiebungen beziehen sich auf das in Abbildung 5-13 dargestellte Koordinatensystem. Darin sind A und B die beiden Hauptachsen, A₀ entspricht der erwarteten Hauptverschiebungsrichtung (zur Landseite des Deichs).

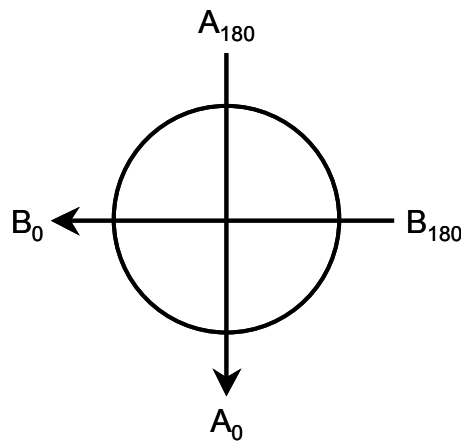


Abbildung 5-13: Koordinatensystem für die Verschiebungsrichtungen der Inklinometermessungen

▪ Feuchtemeßsystem

Das in diesem Forschungsvorhaben eingesetzte Feuchtemeßsystem dient der Erfassung orts aufgelöster Feuchteprofile mittels *Time Domain Reflectometry* (TDR). Die Profile werden entlang der im Deichkörper installierten Feuchtesensoren gemessen.

Das System wurde am Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, Abteilung Erd dammbau und Deponiebau, der Universität Karlsruhe (TH) entwickelt.

Die Feuchtesensoren bestehen aus Flachbandkabeln, die über Sensorschalter beidseitig angeschlossen sind. Die Sensorschalter ermöglichen es, am Ende des Flachbandkabels unterschiedliche elektrische Leitungsbedingungen zu erzeugen (Hübner et al. 2003). So wird innerhalb des Zeitsignals ein einfaches und genaues Auffinden des Leitungsendes ermöglicht, um die Laufzeit des Signals im Sensor zu ermitteln. Über die Laufzeit kann unter Berücksichtigung einer Kalibrierfunktion die mittlere Feuchte entlang des Sensors bestimmt werden (Scheuermann et al. 2002). Mittels eines Rekonstruktionsalgorithmus wird der gesamte Informationsgehalt des Zeitsignals nutzbar gemacht und eine orts aufgelöste Feuchteverteilung (spatial TDR) ermittelt (Schlaeger 2003).

Die einzelnen Feuchtemeßkabel verlaufen jeweils vertikal in den beiden Meßprofilen. Da die Feuchteverteilung sowohl in der Dichtung, als auch im Stützkörper aufgezeichnet werden soll, sind in einigen Positionen zwei Sensoren übereinander verlegt. Dies ist erforderlich, da es meßtechnisch unvorteilhaft ist, mit einem Sensor zwei unterschiedliche Materialien zu durchdringen.

Der Verlauf der einzelnen Sensoren zur Feuchtemessung ist in Abbildung 5-14 zu erkennen. Die Sensoren wurden während der Bauphase des Versuchsdeichs installiert.



Abbildung 5-14: Installation der Feuchtemeßsensoren während dem Bau des Versuchsdeichs

Die eigentlichen Meßgeräte befinden sich in Verteilerkästen auf der Deichkrone: In zwei Nebenverteilern, die sich im Bereich der jeweiligen Meßprofile befinden, laufen die zu den Sensorkabeln führenden Koaxialkabel zusammen. Die beiden Nebenverteilern sind mit einem Hauptverteilerkasten verbunden, von dem aus die Meß- und Steuerleitungen zum Bürocontainer, der sich hinter den Sickerwassersammelschächten befindet, laufen. Dort befindet sich ein PC mit LINUX-Betriebssystem zur Steuerung und Datenerfassung.



Abbildung 5-15: Neben- und Hauptverteilerkästen des Feuchtemeßsystems

▪ Sickerwasserpegel

Als Ergänzung zum oben beschriebenen Feuchtemeßsystem sind in den beiden Meßquerschnitten jeweils fünf Sickerwasserpeilrohre zur manuellen Bestimmung der Sickerwasserstände im Deichkörper mittels Kabellichtlot installiert (Abbildung 5-16).

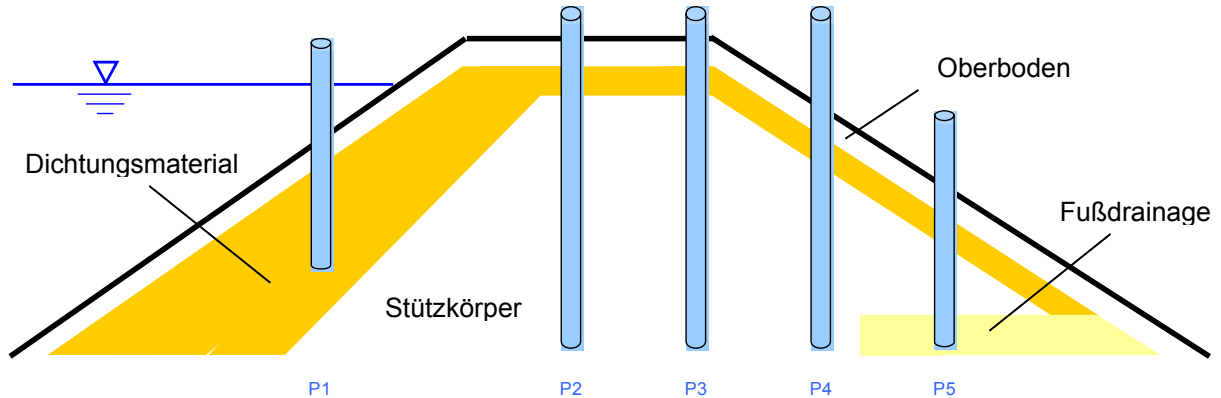


Abbildung 5-16: Lage der Sickerwasserpegel (schematisch)

Das Pegelrohr auf der wasserseitigen Böschung (P1) endet in der Tondichtung, P2, P3 und P4 befinden sich im Stützkörper und P5 mündet in der Fußdrainage.

Die Pegel dienen zudem der Probenahme für die Wasseranalyse. Eine etwaige Anreicherung des Sickerwassers mit löslichen Stoffen während der Durchströmung des Recyclingmaterials kann so überprüft werden.

▪ Temperatursonden

In den beiden Meßquerschnitten sind jeweils drei Temperaturgeber der Firma Thies installiert. Sie befinden sich an der Außenseite der die Inklinometerrohre umhüllenden PVC-Rohre. Sie ermöglichen die Messung von Temperaturänderungen im Recyclingmaterial im Verlauf des Sickerweges.

▪ Sickerwasser-Meßwehre

Zur Bestimmung des Sickerwasserabflusses sind in den beiden Sickerwasserschächten Meßwehrkästen der Firma Glötzl installiert. Diese eignen sich besonders bei geringen Wassermengen (Größenordnung 0,0001 – 2,0 l/s).

Das aus dem Fußfilter austretende Sickerwasser fließt in den Meßwehrkasten, nachdem es im Graben am landseitigen Böschungsfuß gefaßt wurde. Der Auslaß des Kastens fungiert als Meßwehr in Form einer Lochblende auf der Vorderseite, durch die das Wasser ausströmt (Abbildung 5-17). Mit zunehmenden Sickerwassermengen steigt der Wasserstand im Kasten. Über eine zugehörige Abflußkurve bzw. eine Kalibriertabelle kann jedem Wasserstand im Wehrkasten ein Abfluß zugeordnet werden.

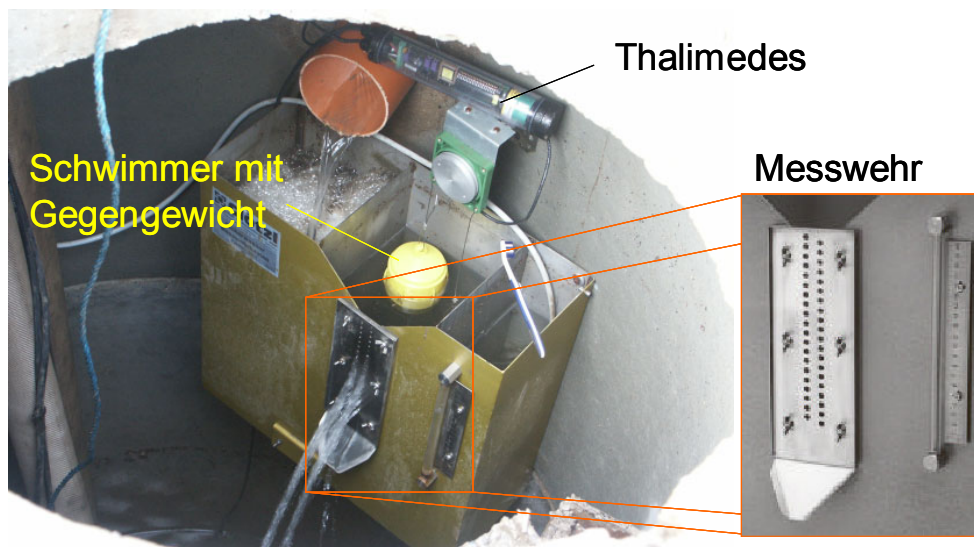


Abbildung 5-17: Sickerwassermeßwehrkasten mit Meßsystem Thalimedes

Der Wasserstand im Wehrkasten kann an der neben dem Lochblech vorhandenen Füllstandsanzeige abgelesen werden, wird aber auch kontinuierlich mit einem Thalimedes (s. nächsten Abschnitt „Wasserstandsmesser“) gemessen und an das zentrale Datenerfassungssystem im Bürocontainer übermittelt.

▪ Wasserstandsmesser

Es kommen zwei unterschiedliche Systeme der Firma Ott zur Messung von Wasserständen zum Einsatz:

1. Winkelcodierer mit Datensammler „Thalimedes“
2. Intelligente Sensorkarte nach dem Einperlprinzip „Nimbus“

Das Thalimedes-Meßsystem dient der kontinuierlichen Messung von Wasserständen. Über ein Schwimmer-Seil-Gegengewicht-System werden Wasserstandsänderungen auf das Schwimmerrad der Gebereinheit übertragen (Abbildung 5-17). Die daraus resultierende Drehbewegung des Schwimmerrads wird in ein elektrisches Signal gewandelt, an die Datensammlereinheit übertragen und anschließend als Meßwert abgespeichert. Die Datensammlereinheit wird wiederum vom zentralen Datenerfassungssystem im Bürocontainer ausgelesen. Dieses System kommt in den oben beschriebenen Sickerwasser-Meßwehrkästen zum Einsatz.

Das Nimbus-Meßsystem wird zur Erfassung von Wasserstandsänderungen im Eintaubecken verwendet. Es arbeitet nach dem Einperlprinzip: Die durch eine Kolbenpumpe erzeugte Druckluft strömt über eine Meßleitung und den Ausperltopf in den vor dem Versuchsdeich befindlichen Wasserkörper. Der sich dabei in der Meßleitung einstellende Überdruck ist direkt proportional zur Wassersäule über dem Ausperltopf. Durch aufeinanderfolgende Messung des barometrischen Luftdrucks und des Einperldrucks berechnet die Sensorkarte über Differenzbildung der beiden Signale die Höhe des Wasserstandes über dem Ausperltopf.

▪ Niederschlagsmesser

Um den Einfluß des Niederschlags bei den anderen Messungen berücksichtigen zu können, ist auf dem Dach des Bürocontainers ein Niederschlagsmesser installiert. Durch eine Kippvorrichtung sendet dieser bei Erreichen eines bestimmten Füllstandes einen Impuls an das Datenerfassungssystem.

▪ Zentrales Datenerfassungssystem

Die gemessenen Daten der verschiedenen oben beschriebenen Meßgeräte laufen in einem zentralen Datenerfassungssystem zusammen. Das System befindet sich in einem Meßgeräteschrank im Bürocontainer hinter der landseitigen Deichböschung (Abbildung 5-18).

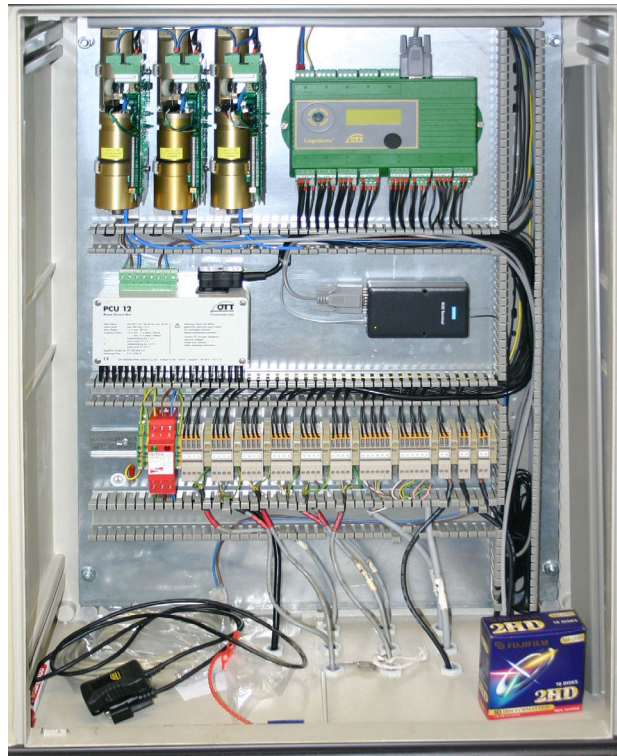


Abbildung 5-18: Zentrales Datenerfassungssystem

Das Herzstück bildet die Speichereinheit, die wiederum von einem PC zur weiteren Datenverarbeitung ausgelesen werden kann. Ein Rechner mit entsprechender Auswerte- und Analysesoftware befindet sich ebenfalls im Bürocontainer, so daß die Messungen bereits während der Versuchsdurchführung begutachtet werden können.

5.1.4 Beprobung des Sickerwassers

Während der Versuche wurde das Sickerwasser, das zur Analyse der Inhaltsstoffe herangezogen wurde, jeweils im Sammelschacht vor dem Eintritt in den Wehrkasten entnommen.

Die beim zweiten und dritten Einstauversuch zusätzlich gewonnenen Sickerwasserproben aus den Pegeln der beiden Meßquerschnitte wurden mit Hilfe eines Schlauches aus diesen abgepumpt und in die entsprechenden Transportbehälter gefüllt.

Das Sickerwasser wurde auf physikalische (pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit) und chemische (Metalle, Anionen, organische Substanzen) Parameter hin untersucht. Als Referenz wurde bei allen Versuchen das Einstauwasser beprobt und analysiert.

5.1.5 Versuchsbeschreibung

Im Forschungsvorhaben wurden drei Versuche zur Simulation lang anhaltender Hochwasser durchgeführt.

- Versuch 1: August / September 2003
- Versuch 2: November / Dezember 2003
- Versuch 3: Dezember 2004



Abbildung 5-19: Versuchsdeich während des zweiten Einstauversuchs

Der Wasserstand im Spundwandkasten vor der wasserseitigen Deichböschung betrug bei den Einstauversuchen ca. 2,50 m über KDB bzw. 0,50 m unter Deichkrone (Abbildung 5-19). Somit waren die Belastungen durch den Wasserdruck größer als sie bei einem theoretischen Bemessungshochwasser ausfallen würden: Laut DVWK-Merkblatt 210/1986 („Flußdeiche“) sollte bei einem Wasserstand von 2,50 m über dem Gelände ein Freibordmaß von 0,7 m gewährleistet sein. Durch regelmäßiges Nachfüllen wurde der Beckenwasserstand relativ konstant gehalten, um so möglichst stationäre Fließvorgänge im Deichkörper bzw. eine komplett ausgebildete Sickerlinie zu erzielen.

Die Einstauversuche wurden durch das Abpumpen des Wassers aus dem Spundwandkasten mittels Tauchpumpe beendet (Abbildung 5-20 links). Das Meßprogramm wurde nach dem Abstau fortgeführt, um das Abfließen des Sickerwassers aus dem Deichkörper zu verfolgen. Das abgepumpte Wasser wurde in ein Grabensystem au-

ßerhalb des Versuchsgeländes geleitet, das zur Entwässerung der umliegenden landwirtschaftlichen Flächen dient und in den Rhein mündet (Abbildung 5-20 rechts).



Abbildung 5-20: Abpumpen des Wassers im Einstaubereich

Bei den Einstauversuchen wurde folgendes Meßprogramm durchgeführt:

- Sickerwasserpeilrohre mittels Kabellichtlot
- Beckenwasserstand
- Sickerwassermengen durch Meßwehrkasten und „Eimermessungen“
- Inklinometer
- Meßsystem der Firma Ott (Beckenwasserstand, Niederschlag, Bodentemperatur, Wasserstände Meßwehre, Temperatur und Leitfähigkeit des Sickerwassers)
- Feuchtemeßsystem

Die „Eimermessungen“ zur Bestimmung des Sickerwasserabflusses wurden täglich als Ergänzung der kontinuierlichen Abflußmessungen über das Thalimedes-System durchgeführt, um so eine Plausibilitätskontrolle zu erzielen. Hierzu wurde ein 5-Liter-Eimer unter den Auslauf des Meßwehrkastens gehalten und die Zeit gemessen, bis der Eimer gefüllt war (Abbildung 5-21). Durch mehrmaliges Wiederholen der Messung und Mittelwertbildung wurde so ein guter Vergleichswert bestimmt.



Abbildung 5-21: Eimermessung zur Sickerwasserabflußbestimmung

Im Laufe der Einstauversuche stellte sich heraus, daß bereits nach kurzer Zeit des Einstaus Sickerwasser aus dem landseitigen Fußfilter austrat. Die anfallenden Sickerwassermengen lagen erheblich über den erwarteten. Außergewöhnlich war auch der Austritt von Sickerwasser oberhalb des Fußfilters. Dieser Austritt machte sich in Form einer großflächigen, starken Vernässung des Mutterbodens weit oberhalb des Deichfußes bemerkbar (Abbildung 5-22). Die große Menge an Sickerwasser sowie der Austritt von Wasser oberhalb des Fußfilters ließen auf folgende Baumängel schließen:

- Schlechte Funktion der wasserseitigen Tondichtung (zu durchlässig)
- Versagen des Fußfilters

Als Folge war ein Rückstau des Sickerwassers im Deichkörper zu verzeichnen, der zu einem sehr hohen Wasserstand und einer nahezu horizontalen Sickerlinie im Abschnitt des Stützkörpers aus RC-Material führte. Dieser nicht vorgesehene hydraulische Zustand stellte eine außergewöhnliche Belastung dar und kann als „Worst-Case-Szenario“ betrachtet werden, da sich die hohen Wasserstände negativ auf die Standsicherheit des Deichs auswirken. Speziell die Gefahr eines landseitigen Böschungsbruchs oder von Rutschungen im Bereich des Oberbodens wird durch die hohen Sickerwasserstände vergrößert.

Die bautechnischen Mängel wurden im Verlauf des Forschungsvorhabens durch den Austausch des Bodenmaterials im Dränkörper am landseitigen Böschungsfuß durch Kiessand mit einer höheren Durchlässigkeit weitestgehend behoben. Außerdem wurden die seitlichen Anschlüsse der wasserseitigen Tondichtung an die KDB durch

das Anschweißen zusätzlicher KDB-Laschen als Sickerschikane verbessert. Es sei an dieser Stelle zudem ausdrücklich darauf hingewiesen, daß die erhöhten Sickerwassermengen und Sickerwasserstände im Stützkörper in keinem Zusammenhang mit den hier verwendeten und auf Eignung im Deichbau untersuchten Recyclingmaterialien standen. Die daraus resultierende höhere hydraulische Belastung stellte lediglich größere Anforderungen hinsichtlich der Standsicherheit an die verwendeten Sekundärrohstoffe.

Nachfolgend ist der zeitliche Verlauf der Einstauversuche mit den wichtigsten Beobachtungen näher beschrieben.

5.1.5.1 Einstauversuch 1

Versuchsablauf:

Beginn Füllvorgang:	Mittwoch, 27.08.2003 10:30 Uhr
Unterbrechung Füllvorgang:	27.08.2003 19:30 Uhr bis 28.08.2003 09:30 Uhr
Ende Füllvorgang:	Donnerstag, 28.08.2003 18:30 Uhr
Beginn Abstau:	04.09.2003 11:00 Uhr (Versuchsabbruch)
Ende Abstau:	05.09.2003 10:00 Uhr

Beobachtungen:

Bereits am Freitag, den 29.08.2003, wurde vormittags erstes Sickerwasser beobachtet: Aus beiden Deichhälften lief Wasser in die Sickerwassersammelschächte, im Bereich des RC-Baustoffes deutlich mehr als im MV-Schlackeabschnitt. Es stellte sich heraus, daß es sich um Sickerwasser handelte, das durch Fehlstellen in der wasserseitigen Tondichtung in den Deichkörper eindrang.

Mehrfache Beobachtungen am Wochenende zeigten einen konstanten Zustand.

Sickerwassermengen:	RC-Baustoff: ca. 10 l/min
	MV-Schlacke: ca. 3,5 l/min

Feuchte Bereiche auf der landseitigen Böschung deuteten auf eine mangelnde Funktionstüchtigkeit des Fußfilters hin, die durch eine zu geringe Durchlässigkeit zu Wasseraustritt in der Böschung führte (Abbildung 5-22).



Abbildung 5-22: Wasseraustritt aus der landseitigen Böschung im Bereich des RC-Baustoffs (Versuch 1)

Die manuellen Sickerwasser-Pegelmessungen begannen am 01.09.2003. Der Versuch wurde am 04.09. abgebrochen und das Einstauwasser abgepumpt, um eine Erkundung der Lehmdichtung vorzunehmen.

5.1.5.2 Einstauversuch 2

Versuchsablauf:

Beginn Füllvorgang:	Montag, 24.11.2003 10:30 Uhr
Unterbrechung Füllvorgang:	24.11.2003 21:00 Uhr bis 25.11.2003 10:45 Uhr
Ende Füllvorgang:	25.11.2003 15:00 Uhr
Nachfüllungen:	26.11., 28.11. und 03.12.2003
Beginn Abstau:	16.12.2003 11:00 Uhr
Ende Abstau:	17.12.2003 10:00 Uhr

Beobachtungen:

Bereits am Ende des ersten Einstautages (Mo. 24.11.), also ca. 8 Stunden nach Einstaubeginn, konnte im vordersten Pegel des RC-Baustoffs ($P_{1,RC-B}$) Sickerwasser festgestellt und der Wasserstand gemessen werden. Am nächsten Morgen hatten in diesem Abschnitt bereits die ersten drei Pegel ($P_{1,RC-B}$, $P_{2,RC-B}$, $P_{3,RC-B}$) sowie der Pegel in der Lehmdichtung auf der MV-Schlackeseite ($P_{1,MV-S}$) Kontakt mit dem Sickerwasser. Der Pegel in der Dichtung des MV-Schlacken-Abschnitts ($P_{1,MV-S}$) erreichte

im Laufe des zweiten Versuchstages sogar nahezu den Maximalstand. Am dritten Tag (Mi. 26.11.) trat das Sickerwasser im Bereich des RC-Baustoffs bereits aus der Böschung aus. Am 28.11.2003 konnte erster Sickerwasseraustritt im MV-Schlacke-Abschnitt beobachtet werden.

Wie beim ersten Versuch vom August/September 2003 trat das Sickerwasser nicht wie vorgesehen ausschließlich durch den Fußfilter aus, sondern ebenfalls im darüber liegenden Böschungsbereich. Zudem stellte sich keine typische Sickerlinie ein, da sich das Wasser im Deichkörper rückstaute.

In der nachfolgenden Tabelle sind die maximalen Sickerwasserstände und Sickerwasserabflüsse dargestellt:

Tabelle 5-3: Maximale Sickerwasserstände und -abflüsse (Versuch 2)

	h_{\max}	Q_{\max}
RC-Baustoff	1,80 m ü. KDB	8,4 l/min
MV-Schlacke	1,05 m ü. KDB	2,7 l/min

Der maximale Beckenwasserstand betrug ca. 2,50 m ü KDB.

Am 09.12.03 war die Wasseroberfläche im Eintaubecken komplett zugefroren. Auch die Bereiche der landseitigen Böschung, an denen das Sickerwasser austrat, und die Sammelgräben waren teilweise gefroren (Abbildung 5-23).



Abbildung 5-23: Gefrorener Böschungsfuß (Versuch 2)

5.1.5.3 Einstauversuch 3

Versuchsablauf:

Beginn Füllvorgang:	Montag, 29.11.2004 07:45 Uhr
Unterbrechung Füllvorgang:	29.11.2004 15:30 Uhr bis 30.11.2004 08:15 Uhr
Ende Füllvorgang:	30.11.2004 15:15 Uhr
Nachfüllungen:	06.12. und 13.12.2004
Beginn Abstau:	20.12.2004 13:00 Uhr
Ende Abstau:	21.12.2003 14:00 Uhr

Beobachtungen:

In den zur Wasserseite hin gelegenen Sickerwasserpegeln konnte bereits einen Tag nach Beginn des Einstaus Sickerwasser festgestellt werden. Im Vergleich zum vorangegangenen Versuch waren die maximalen Pegelstände im Deichkörper deutlich niedriger, was auf die höhere Durchlässigkeit des Filtermaterials des zuvor erneuerten Fußdräns zurückzuführen ist. Es konnte auch kein Sickerwasseraustritt in der landseitigen Böschung oberhalb des Fußfilters beobachtet werden.

In der nachfolgenden Tabelle sind die maximalen Sickerwasserstände und Sickerwasserabflüsse zusammengestellt:

Tabelle 5-4: Maximale Sickerwasserstände und -abflüsse (Versuch 3)

	h_{\max}	Q_{\max}
RC-Baustoff	1,15 m ü. KDB	9,4 l/min
MV-Schlacke	1,05 m ü. KDB	2,9 l/min

5.1.6 Versuchsergebnisse

5.1.6.1 Standsicherheit

Zur Überprüfung und Gewährleistung der Standsicherheit wurden während der durchgeführten Versuche regelmäßig Inklinometermessungen durchgeführt.

Unmittelbar vor Beginn der Versuche wurde jeweils eine Referenzmessung durchgeführt, um einen möglichst zeitnahen Bezug für die tatsächlichen, aktuellen Verschiebungen zu haben. Die versuchsbegleitenden Messungen wurden am Anfang der Versuchsphase täglich durchgeführt.

Die während des Einstaus gemessenen Verschiebungen in den vier horizontalen Hauptrichtungskomponenten liegen alle in einem Bereich kleiner als 2 mm. Trotz der hohen Belastung des Deichs durch den Wasserdruck kann keine Verschiebung des Deichkörpers in Richtung der landseitigen Böschung beobachtet werden. Vielmehr weisen die verschiedenen Meßergebnisse die Tendenz einer minimalen Verschiebung (< 2 mm) zur Wasserseite hin auf (Abbildung 5-24). Dies ist mit geringfügigen Setzungen des Deichkörpers, verursacht durch dessen von der Lehmdichtung her beginnende Wassersättigung, zu begründen. Diese Tendenz ist in beiden Meßquerschnitten zu beobachten, also nicht vom verwendeten Recyclingmaterial abhängig. Ein derartiges Verschiebungsverhalten ist an anderer Stelle in Erddämmen und Deichen beim Einstau bereits beobachtet worden.

Auch in Richtung der Deichachse kommt es zu geringfügigen Verschiebungen im Millimeterbereich. Zum einen können diese ebenfalls aus Setzungen infolge der Wassersättigung resultieren, zum anderen muß die Streuung der Ergebnisse aufgrund von Meßungenauigkeiten bzw. Toleranzen berücksichtigt werden. Zu diesem Zweck wurde eine Nullmessung durchgeführt, bei der am selben Meßpunkt dreimal hintereinander die identische Messung durchgeführt wurde. Hier sind maximale Verschiebungen von 0,4 mm zu beobachten (Abbildung 5-25).

An dieser Stelle sei auf die kritische Belastung der landseitigen Böschung durch den extrem hohen Sickerwasserstand im Deichkörper hingewiesen. Aufgrund der hohen Scherfestigkeit der verwendeten Materialien kam es trotz Sickerwasseraustritt aus der Böschung zu keinerlei Verformungen, die auf einen bevorstehenden Böschungsbruch hingedeutet hätten.

Möglichkeiten zur Optimierung von Sanierungsmaßnahmen an Flußdeichen

5 Untersuchungen zur Entwicklung neuartiger Sanierungsverfahren

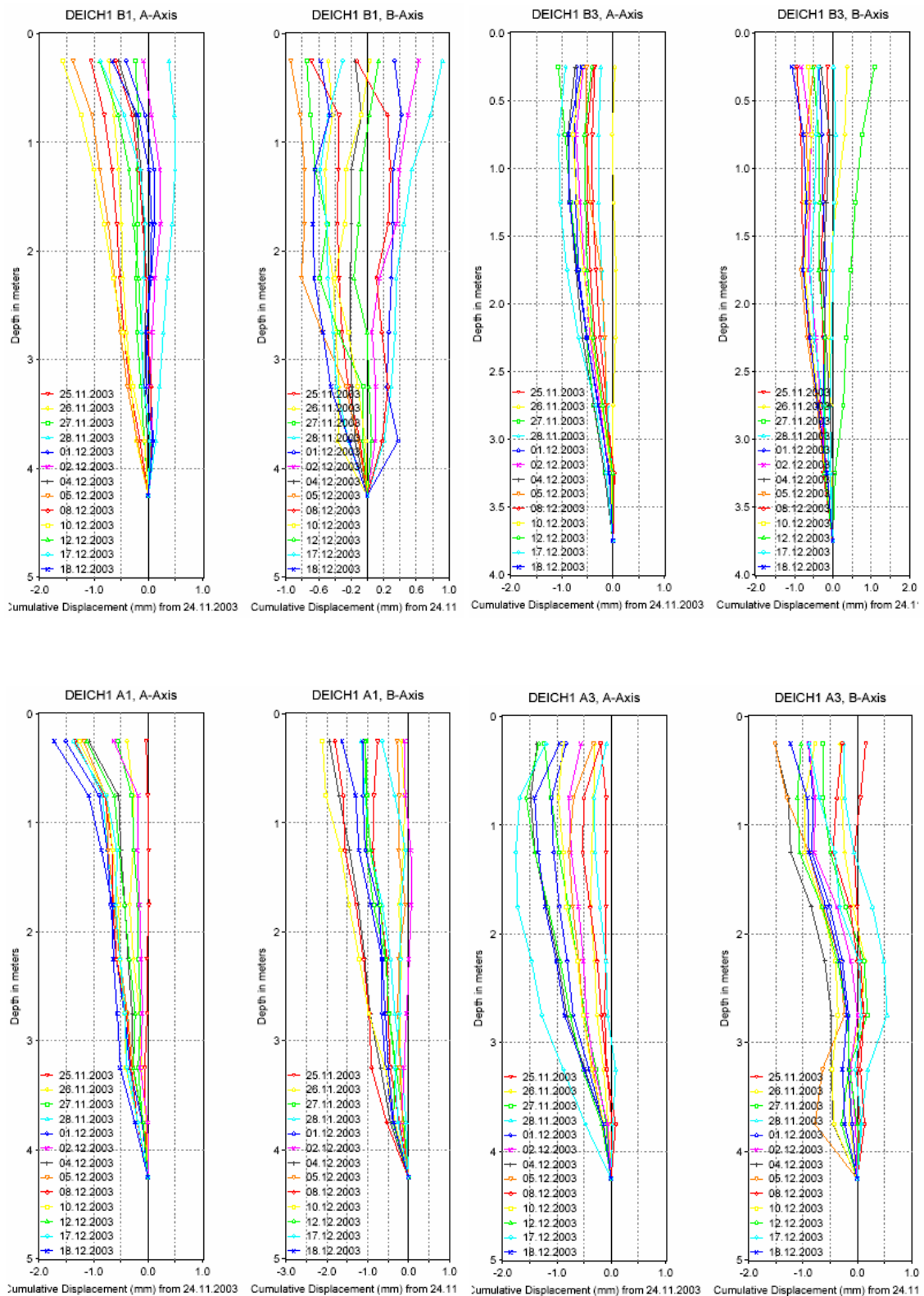


Abbildung 5-24: Verschiebungen in den Hauptachsen, Versuch 2

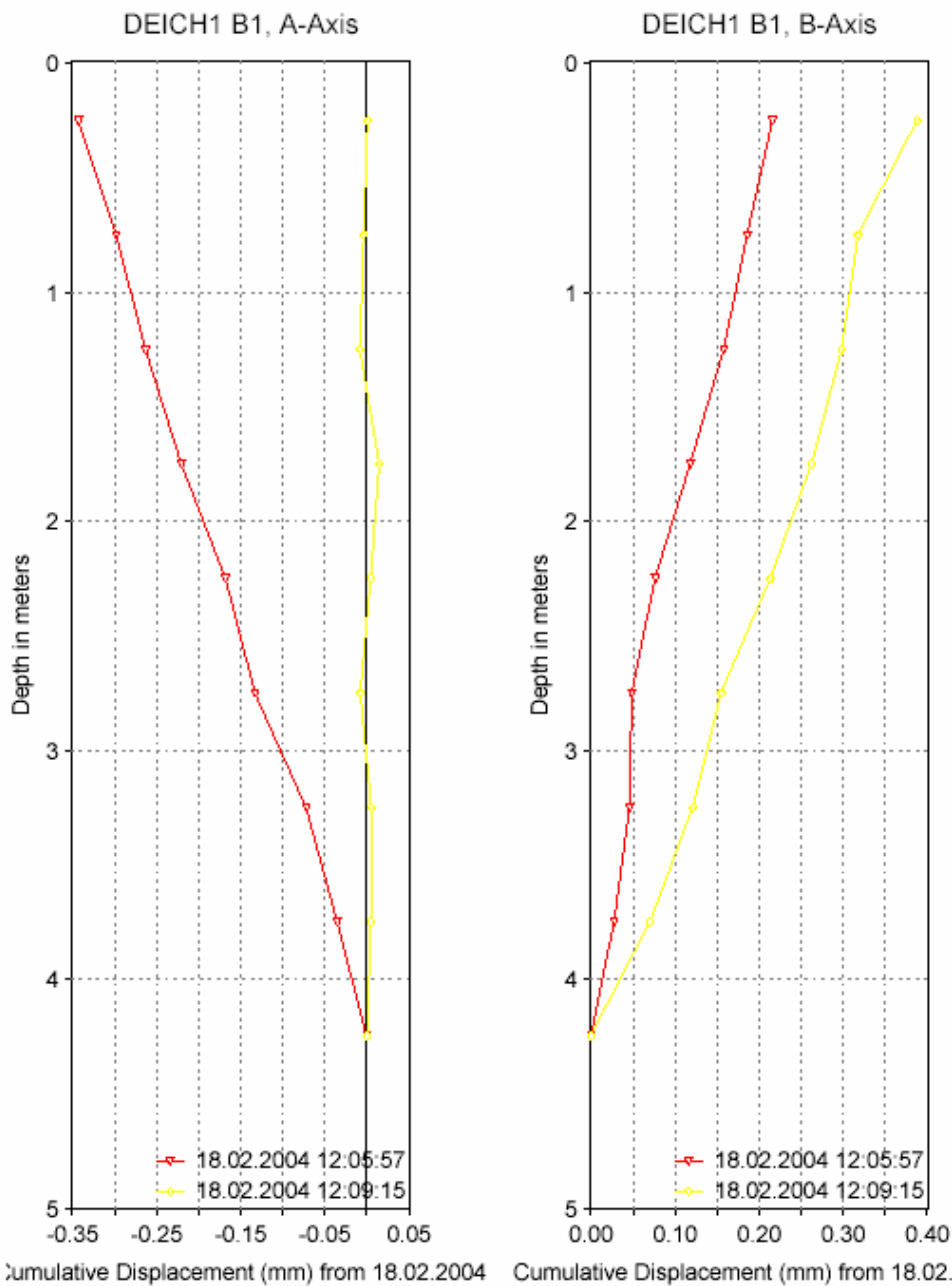


Abbildung 5-25: Verschiebungen in den Hauptachsen am Meßpunkt B1, Nullmessung

5.1.6.2 Hydraulische Eigenschaften

Im Folgenden wird auf die beobachteten und gemessenen hydraulischen Eigenschaften des Versuchsdeichs eingegangen. Hierbei ist zu beachten, daß die Materialeigenschaften aller hier verwendeten Baustoffe eine Rolle spielen: Da es sich um einen Zwei-Zonendeich handelt, ist zunächst die Durchlässigkeit des wasserseitigen Dichtungskörpers für die in den Deichkörper eindringende Wassermenge maßgebend. Für das Ausbilden einer typischen Sickerlinie im Deichkörper ist das ungehin-

derte Austreten des Sickerwassers durch den landseitigen Fußfilter, der eine deutlich höhere Durchlässigkeit als das Material des Stützkörpers aufweisen sollte, wichtig.

Sickerwasserstände im Deich

Der in Abbildung 5-26 dargestellte zeitliche Verlauf der Sickerwasserstände an den unterschiedlichen Meßstellen im Deichkörper gibt den gesamten Verlauf des zweiten Dauereinstauversuchs wieder (s. auch Anlage 1). Die oberste, blau gestrichelte Linie zeigt den Wasserstand im Becken vor der wasserseitigen Böschung. Sehr gut sind der Einstauvorgang, das Absinken des Wasserspiegels infolge der Deichdurchströmung und die Nachfüllvorgänge zum erneuten Anheben des Beckenwasserstandes zu erkennen.

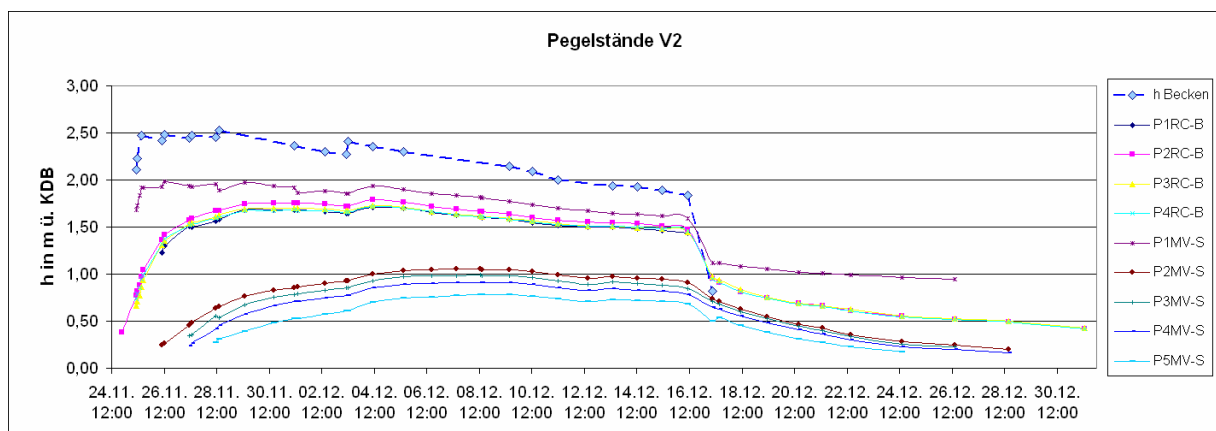


Abbildung 5-26: Zeitlicher Verlauf der Sickerwasserpegelstände, Versuch 2

Die anderen Verläufe repräsentieren jeweils einen Sickerwasserpegel. Es ist deutlich zu erkennen, daß die Pegelstände im Bereich des RC-Baustoffs wesentlich schneller steigen, als die MV-Schlacke-Pegel. Auch die maximalen Sickerwasserstände sind im RC-Baustoff deutlich höher als im Bereich der MV-Schlacke. Aufgrund der bereits mehrfach angesprochenen Problematik von Fehlstellen in der wasserseitigen Lehm-dichtung ist jedoch nicht auszuschließen, daß das unterschiedliche Ansteigen der Sickerwasserstände in den beiden hydraulisch voneinander getrennten Bereichen (RC-Baustoff und MV-Schlacke) durch Inhomogenitäten im Verlauf des Dichtungskörpers begründet ist. Daß derartige Inhomogenitäten vorhanden sind, zeigt der Vergleich der Verläufe von $P_{1,RC-B}$ und $P_{1,MV-S}$, die sich beide in der Lehm-dichtung befinden: P_1 im RC-Baustoff steigt nach vollendetem Einstauvorgang allmählich an und erreicht einen Maximalwert, der etwa einen halben Meter unter dem Sickerwasserstand im RC-Baustoff des selben Meßquerschnitts liegt. Hier scheint die Lehm-dichtung demnach besser zu funktionieren, als in anderen Bereichen des RC-Baustoff-Abschnitts, da der höhere Wasserstand im Stützkörper nur durch das Eindringen von Sickerwasser durch Fehlstellen im Bereich des Dichtungskörpers zu erklären ist. P_1 im Meßquerschnitt des MV-Schlackenbereichs steigt dagegen unmittelbar mit dem

Einstauvorgang an und verläuft durchgehend parallel zum Beckenwasserstand. In diesem Bereich der Dichtung scheint daher eine direkte hydraulische Verbindung zum Einstaubecken zu bestehen bzw. eine Fehlstelle vorzuliegen.

Auffallend ist außerdem, daß alle Wasserstände der hintereinander liegenden Pegel der beiden Meßquerschnitte jeweils in etwa die gleiche Höhe haben. Dies liegt in der zu geringen Leistungsfähigkeit des Fußfilters begründet, was auch an dem in Kapitel 5.1.5 beschriebenen Wasseraustritt aus der landseitigen Böschung oberhalb des Fußfilters zu beobachten ist.

Obwohl die Sickerwasserverluste und der damit verbundene Abfall des Einstauwasserstandes zunächst durch ein mehrmaliges Nachfüllen im Einstaubereich kompensiert wurden, mußte das Halten des Anfangswasserstandes im Becken (ca. 2,50 m ü. KDB) aufgegeben werden, da das Sickerwasser im RC-Baustoff-Abschnitt bedenklich hoch anstieg und somit erhöhte Gefahr eines Böschungsbruchs auf der Landseite bestand.

Beim dritten Einstauversuch, der nach Austausch der Fußdrainage im Dezember 2004 durchgeführt wurde, stellten sich vergleichsweise niedrigere Wasserstände im Deichkörper ein. Aufgrund der höheren Durchlässigkeit des ausgetauschten Filterkieses konnte das Sickerwasser leichter am Böschungsfuß austreten. Der nach wie vor sehr hohe Pegelstand im vordersten Pegelrohr des MV-Schlacke-Abschnitts ($P_{1,MV-S}$ in Abbildung 5-27) läßt sich wieder durch die vermuteten Kurzschlußströmungen in Fehlstellen der mineralischen Dichtung erklären.

Abbildung 5-27 zeigt den zeitlichen Verlauf der gemessenen Sickerwasserpegelstände im Deichkörper bei Versuch 3 (s. auch Anlage 1).

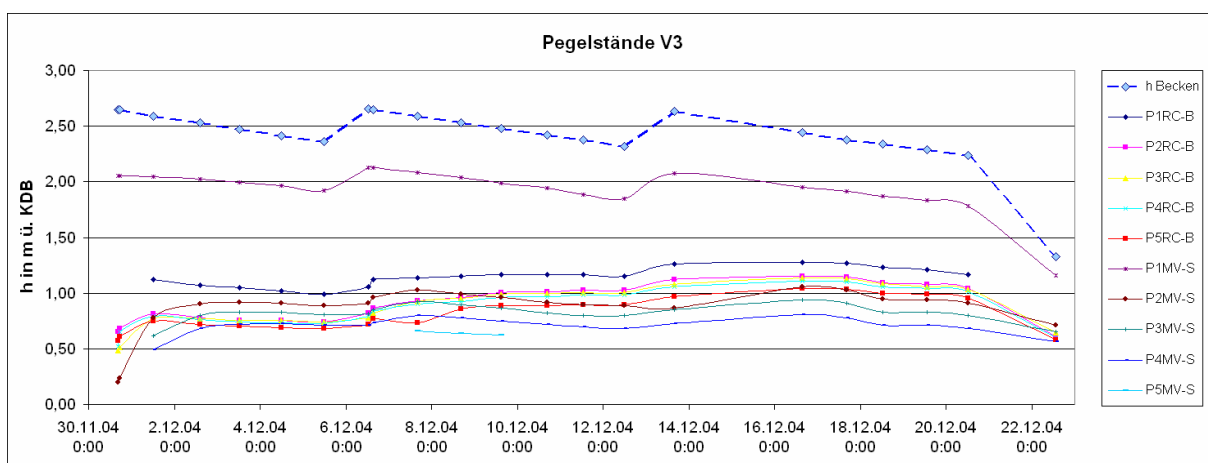


Abbildung 5-27: Zeitlicher Verlauf der Sickerwasserpegelstände, Versuch 3

Sickerlinien (aus Pegelmessung)

Wie bereits im vorigen Abschnitt angesprochen, stellte sich bei den ersten beiden Versuchen keine typische, zur Landseite hin abfallende Sickerlinie ein, da sich das Sickerwasser aufgrund der zu geringen Durchlässigkeit des Fußfilters im Deichkörper zurückstaute. Besonders im Deichabschnitt mit RC-Baustoff als Stützkörpermateriail verlief die Sickerlinie daher nahezu horizontal (Abbildung 5-28) und führte durch ihre hohe Lage zu dem in Kapitel 5.1.5 beschriebenen Wasseraustritt in der Böschung.

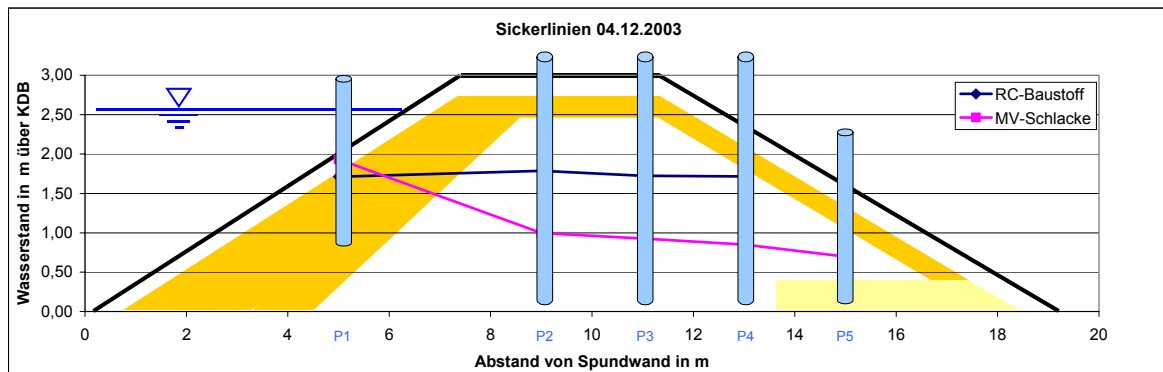


Abbildung 5-28: Verlauf der Sickerlinien in den beiden Deichabschnitten (Versuch 2)

Nach dem Austausch des Filterkieses der Fußdrainage durch durchlässigeres Material vor Versuch 3 wird der Wasserstand im Deichkörper zwar deutlich abgesenkt, die Sickerlinie verläuft jedoch noch immer nahezu horizontal (Abbildung 5-29) und die maximalen Sickerwasserstände sind mit mehr als 1 m über KDB noch immer hoch. Dies ist mit den verhältnismäßig großen Sickerwassermengen infolge der Fehlstellen in der wasserseitigen Lehmdichtung zu begründen.

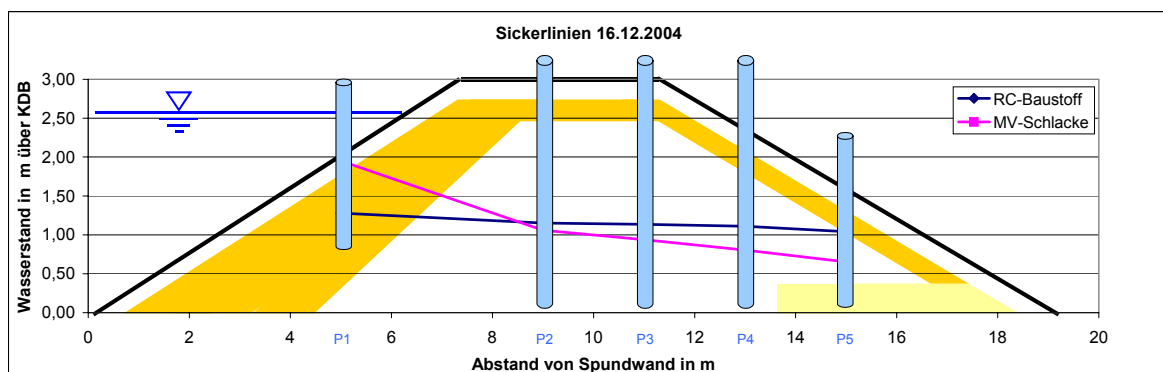


Abbildung 5-29: Verlauf der Sickerlinien in den beiden Deichabschnitten (Versuch 3)

Feuchteverteilung im Deich

Die durch das Feuchtemeßsystem im Deichkörper bestimmte Feuchteverteilung während des Dauereinstaus zeigt die gleichen hydraulischen Eigenschaften des Deichsystems wie die manuellen Pegelmessungen: Auch hier ist ein nahezu horizontaler Wasserstandsverlauf anstelle einer typisch ausgebildeten Sickerlinie zu erkennen. Der untere Bereich des Stützkörpers ist wassergesättigt, während sich im darüber liegenden Bereich eine in erster Linie aus kapillarem Aufstieg begründete Feuchteverteilung einstellt. In Abbildung 5-30 und Abbildung 5-31 sind zusätzlich zur dargestellten Feuchteverteilung in Form des Wassergehalts in Volumenprozent die in den Sickerwasserpegeln manuell gemessenen Wasserstände gekennzeichnet (blaue Dreiecke), die mit dem Übergang gesättigt-ungesättigt gut übereinstimmen.

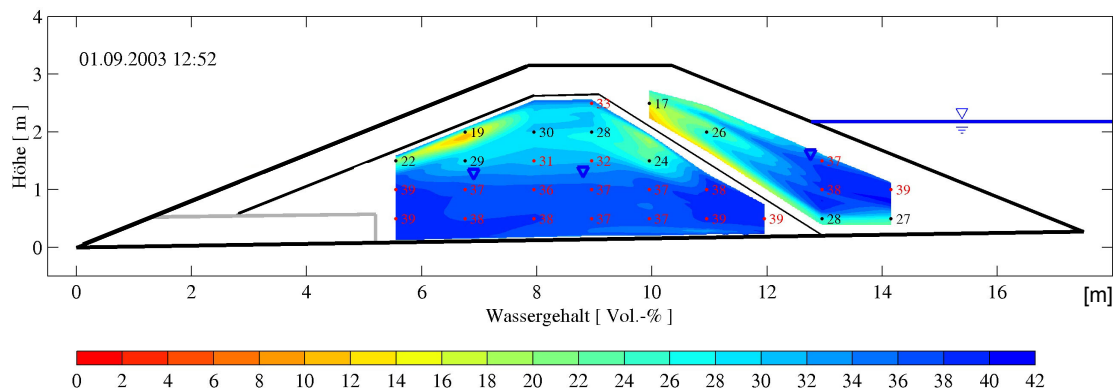


Abbildung 5-30: Feuchteverteilung im Deichkörper, MV-Schlacke-Bereich (Versuch 2)

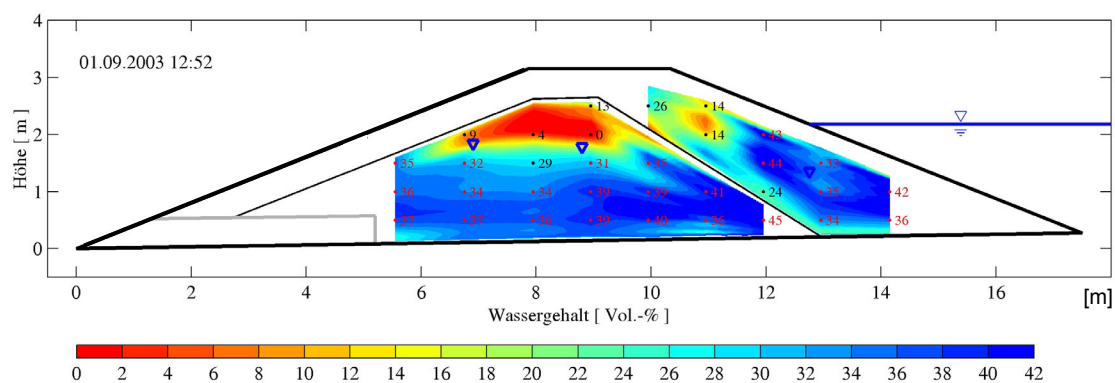


Abbildung 5-31: Feuchteverteilung im Deichkörper, RC-Baustoff-Bereich (Versuch 2)

Die in den Abbildungen gekennzeichneten übereinander liegenden Punkte mit numerischen Angaben des Wassergehalts in Volumenprozent stellen die an den vertikal

verlaufenden Meßkabeln gemessenen Werte dar. Die Bereiche zwischen den einzelnen Meßstrecken wurden zur Visualisierung interpoliert.

Auch hier ist zu erkennen, daß der landseitige Fußfilter vor dem Austausch des Filterkieses eine zu geringe Durchlässigkeit respektive Leistungsfähigkeit hatte: Am linken Rand des Meßbereichs ist der Wasserstand im Deichkörper (Übergang des komplett wassergesättigten Materials zum trockeneren Bereich) noch in gleicher Höhe wie in der Mitte oder in Nähe des Dichtungskörpers. Da man sich hier jedoch bereits kurz vor dem Fußfilter befindet, müßte die wassergesättigte Zone bzw. die Sickerlinie nach unten abfallen. Die Lage der wassergesättigten Zone stimmt auch gut mit dem Bereich, in dem das Sickerwasser aus der Böschung austrat, überein.

Der bei den Einstauversuchen beobachtete Zustand mit einer nahezu horizontal verlaufenden Grenze der Wassersättigung bzw. einer nahezu horizontalen Sickerlinie ist jedoch nicht auf die verwendeten Sekundärrohstoffe zurückzuführen, sondern auf Schwachstellen im Bereich der herkömmlichen Deichbaumaterialien (Dichtungston/Filterkiessand). Die im Forschungsdeich als Stützkörper eingesetzten Materialien zeichnen sich vielmehr durch eine sehr gute Scherfestigkeit aus und sorgen so bei der großen Belastung durch den hohen Wasserstand im Deichkörper für die Standfestigkeit. Das Sickerwasser scheint die Materialien gleichmäßig zu durchströmen, wird jedoch von der landseitigen Oberflächendichtung zurückgestaut, da es nicht ausreichend schnell vom Fußfilter abgeführt werden kann.

Sickerwasserabfluß

Der Sickerwasserabfluß wurde sowohl kontinuierlich über die in den Sickerwassersammelschächten installierte Meßtechnik gemessen und aufgezeichnet, als auch manuell durch Eimermessungen bestimmt.

In Abbildung 5-32 sind die Abflußmessungen des zweiten Versuchs für beide Deichabschnitte dargestellt. Im Diagramm ist außerdem der zugehörige Beckenwasserstand aufgetragen. Man kann erkennen, daß sich wie bei den Sickerwasserpegeln zunächst der Abfluß im Bereich des RC-Baustoffes einem Maximum nähert, und der Anstieg des Sickerwasserabflusses im MV-Schlackenbereich wesentlich träger ist. Der Nachfüllvorgang vom 03.12. hat z. B. einen direkten Einfluß auf den Abfluß im RC-Baustoff-Abschnitt, während dies im Bereich der MV-Schlacke nicht so deutlich zu beobachten ist.

Auffallend ist der relativ starke Abfall des Sickerwasserabflusses (besonders im MV-Schlackenbereich) um den 09.12. In diesem Zeitraum lag die Umgebungstemperatur deutlich unter 0° C, so daß der Fußfilter und die landseitige Böschung an den Stellen, wo das Sickerwasser austrat, gefroren war, was den Wasseraustritt erschwerte. Nach dem Auftauen der Böschung stieg der Abfluß wieder leicht an.

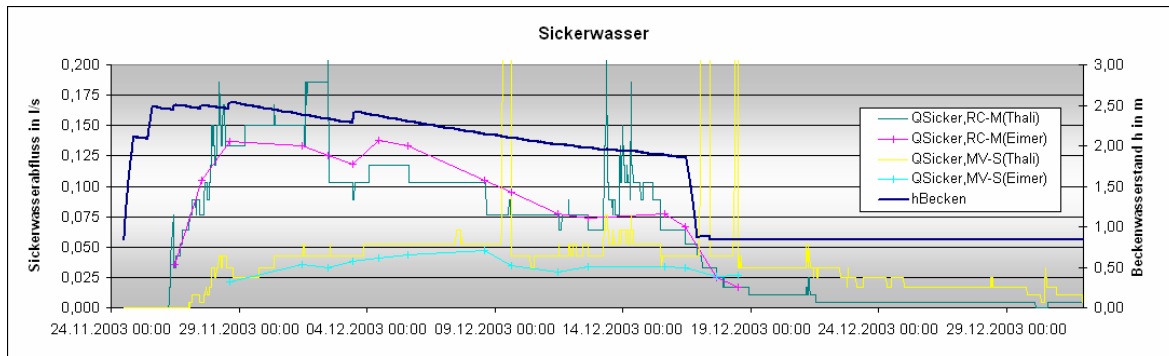


Abbildung 5-32: Sickerwasserabfluß (Versuch 2)

Die in Abbildung 5-32 erkennbaren Abflußspitzen liegen zumeist zeitgleich mit Niederschlagsereignissen (Abbildung 5-33). Da das Grabensystem zum Fassen des Sickerwassers nicht abgedeckt ist und zudem bei starken Niederschlägen von Oberflächenabfluß auf der landseitigen Böschung ausgegangen werden muß, der ebenfalls in die Sammelgräben fließt, haben heftige Niederschläge unter Umständen tatsächlich einen erheblichen Einfluß auf den in den Sickerwasserkästen gemessenen Abfluß. Andere unplausible Abflußspitzen lassen sich durch das zeitweise Ausfallen der Tauchpumpe im Sickerwasserschacht des MV-Schlacke-Abschnitts erklären. Dadurch kam es zu einem so hohen Wasserstand im Schacht, daß das Meßwehr nicht mehr richtig funktionieren konnte.

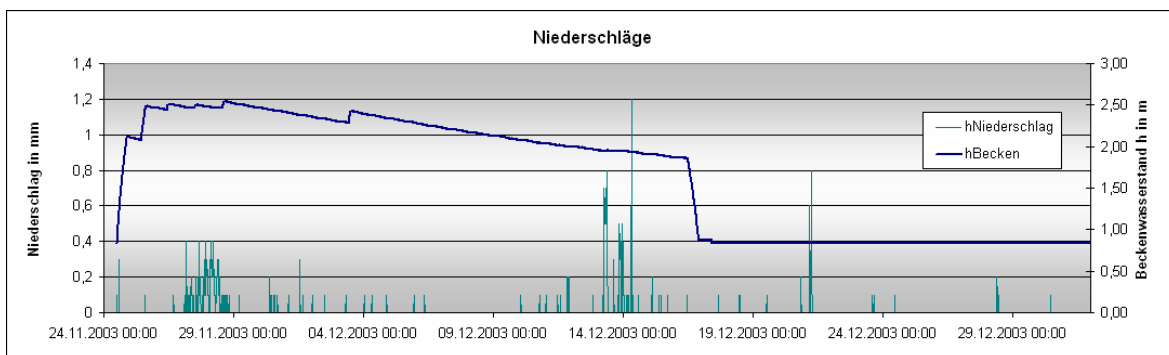


Abbildung 5-33: Niederschläge während des Versuchszeitraums (Versuch 2)

Die Sickerwassermessungen des dritten Versuchs zeigen im Vergleich zum zweiten Versuch sowohl einen höheren Abfluß, als auch eine kürzere Verzögerung zwischen Wasseranstieg im Eintaubecken und Änderung der am Fußfilter austretenden Wassermenge (Abbildung 5-34). Beides ist mit der höheren Durchlässigkeit der vor dem dritten Versuch erneuerten Fußdrainage zu erklären: Es kam bei Versuch 3 nicht zum zuvor beobachteten Rückstau im Deichkörper, da das Sickerwasser ungehindert durch den landseitigen, aus Filterkies bestehenden Fußfilter entweichen konnte.

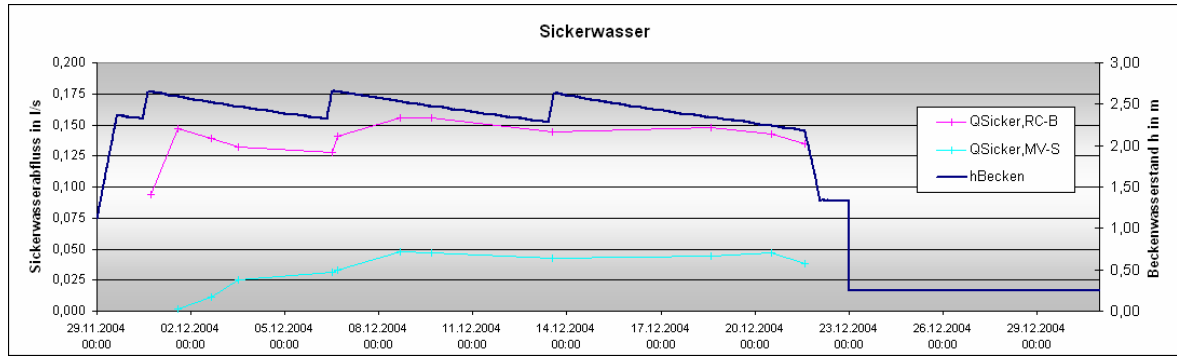


Abbildung 5-34: Sickerwasserabfluß (Versuch 3)

Die in Abbildung 5-34 dargestellten Sickerwasserabflüsse wurden über die oben beschriebene Eimermessung bestimmt. Auf die Messung über die in den Schächten installierten Sickerwassermeßwehre mit Thalimedes wurde bei Versuch 3 verzichtet, da der zweite Versuch gezeigt hatte, daß dieses Meßverfahren systembedingte Meßfehler produziert: Wie bereits beschrieben kam es zuvor durch Pumpenausfall in den Sammelschächten und daraus resultierendem Überstauen der Sickerwassermeßwehrkästen zur Beeinträchtigung der Abflußmessung. Außerdem verursachten Verunreinigungen der Lochbleche in den Meßkästen Fehler bei der kontinuierlichen Datenerfassung. Die Niederschläge während des Versuchszeitraums sind in Abbildung 5-35 dargestellt.

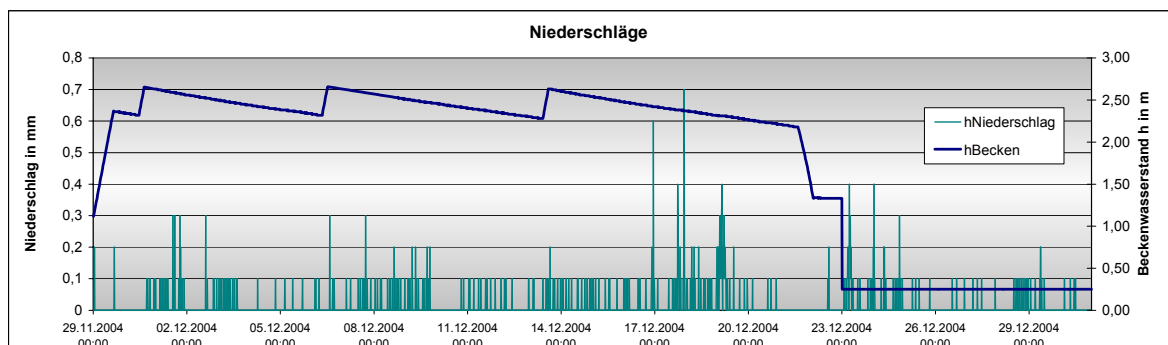


Abbildung 5-35: Niederschläge während des Versuchszeitraums (Versuch 3)

Bodentemperatur

Die gemessenen Verläufe der Bodentemperatur im Deichkörper zeigen den Einfluß des Sickerwassers. In Abbildung 5-36 und Abbildung 5-37 ist der Beckenwasserstand über dem Temperaturverlauf der Versuche 2 und 3 dargestellt.

Obwohl die Temperaturen im Laufe des Einstaus alle abnehmen, ist deutlich zu erkennen, daß die Bodentemperatur im Deichkörper zur Landseite hin ansteigt (die Sonden sind von der Wasserseite her nummeriert). Es liegt nahe, daß der Deichkörper durch das kalte Wasser, das teilweise sogar an der Oberfläche gefroren war (Abbildung 5-19), abkühlt. Auf dem Sickerweg wird das Wasser dementsprechend vom Boden erwärmt.

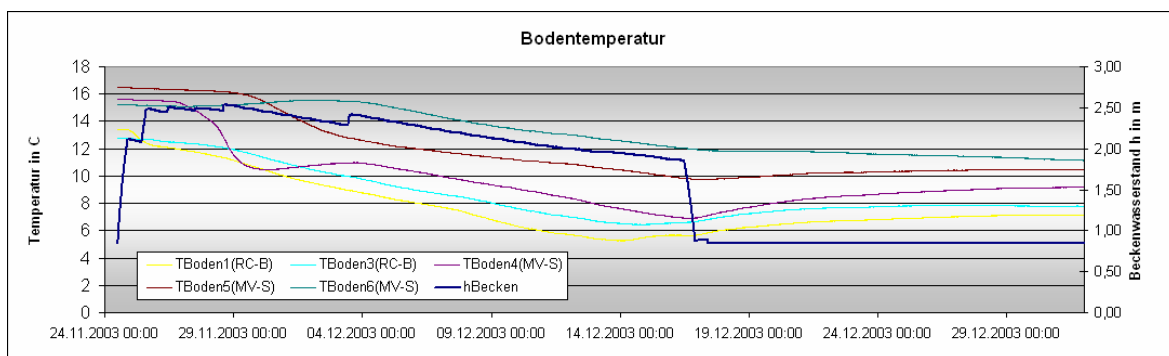


Abbildung 5-36: Verlauf der Bodentemperatur während des Versuchsverlaufs (Versuch 2)

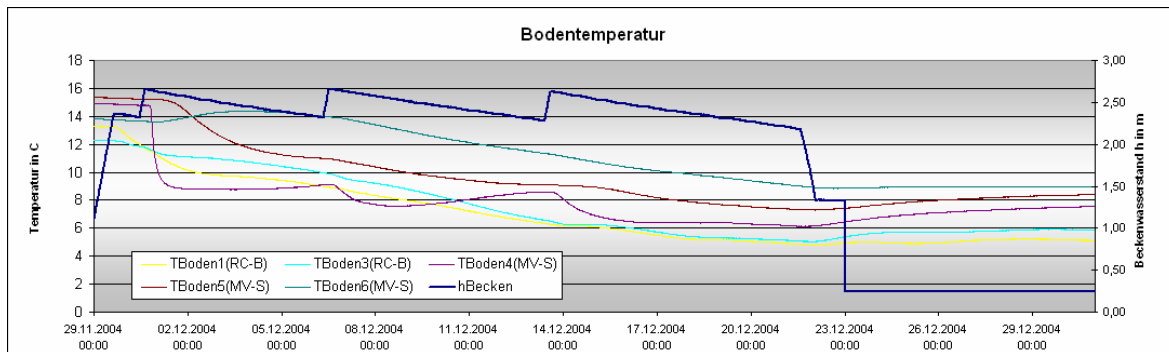


Abbildung 5-37: Verlauf der Bodentemperatur während des Versuchsverlaufs (Versuch 3)

5.1.6.3 Ergebnisse der Sickerwasseranalyse

Die am Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe (TH) durchgeführte Analyse des Sickerwassers ergab, daß hinsichtlich der Umweltverträglichkeit durch die untersuchten Schwermetalle und organischen Parameter keine negative Beeinträchtigung zu erwarten ist. Lediglich beim ersten Einstauversuch traten vereinzelt Überschreitungen von Grenzwerten der Trinkwasserverordnung (TrinkwV) im Bereich der MV-Schlacke auf. Vor allem in diesem Bereich kam es zudem zu deutlichen Überschreitungen der Grenzwerte der Trinkwasserverordnung bei den Parametern Sulfat, Chlorid und elektrische Leitfähigkeit, die jedoch mit der Versuchsdauer abnahmen. Diese Überschreitungen sind auf die Lösung leichtlöslicher Chloride wie Halit (NaCl) und Sylvit (KCl), sowie leichtlöslicher Sulfate wie Anhydrit (CaSO_4) und Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{SO}_4]_3 \times 24\text{H}_2\text{O}$) zurückzuführen, wodurch sich wiederum die elektrische Leitfähigkeit erhöht (Az: 18063). Die im Abschnitt des RC-Baustoffs gemessenen Gehalte dieser Parameter waren jedoch in ähnlicher Größenordnung bereits im Einstauwasser zu beobachten, so daß ein Teil der Inhaltsstoffe hier nicht ausgelaugt, sondern eingespült wurde.

Die Ergebnisse der Sickerwasseranalysen sind in Tabelle 5-5 und Tabelle 5-6 dargestellt und den Grenzwerten der Trinkwasserverordnung, sowie den Eluat-Zuordnungswerten der LAGA 20 gegenübergestellt.

Die Reduzierung der Chlorid- und Sulfatgehalte des Sickerwassers aus dem MV-Schlacke-Abschnitt mit den Versuchen und der Versuchsdauer ist auf Auswaschungseffekte zurückzuführen. Beim dritten Einstauversuch wurden bei den Parametern elektrische Leitfähigkeit und Chlorid bereits Werte in der Größenordnung der Grenzwerte der Trinkwasserverordnung registriert. Dies deutet auf die Abnahme der Menge maximal löslicher Chloride und Sulfate mit der Zeit hin.

Möglichkeiten zur Optimierung von Sanierungsmaßnahmen an Flußdeichen

5 Untersuchungen zur Entwicklung neuartiger Sanierungsverfahren

Tabelle 5-5: Analyseergebnisse des Sickerwassers im Bereich der MV-Schlacke, Grenzwerte der Trinkwasserverordnung (TrinkwV 2001) und Eluat-Zuordnungswerte der LAGA 20 (Az: 18063)

Parameter	Einheit	Einstau- wasser	Sickerwasser			TrinkwV	LAGA 20*	
			1. Versuch	2. Versuch	3. Versuch		Boden Z 0	HMVA Z 2
pH-Wert	-	7,6 - 9,0	7,3 - 8,5	8,0 - 8,6	7,9 - 10,7	6,5-9,5	6,5-9	7-13
el. Leit- fähigkeit	mS/m	114 - 180	1612 - 1715	922 - 1419	135 - 379	250	50	600
Nickel	µg/l	5	27 - 29	11 - 12	< 5	20	40	40
Arsen	µg/l	< 5	21 - 26	5 - 7	< 5	10	10	- ¹⁾
Blei	µg/l	< 5	< 5	< 5	< 2	10	20	50
Cadmium	µg/l	< 0,2 - 0,3	< 0,2	< 0,2 - 0,3	< 0,2	5	2	5
Chrom ges.	µg/l	< 5	< 5	< 5	< 5 - 10	50	15	200
Chrom VI	µg/l	< 10	< 10	< 10	n.a.	-	-	-
Kupfer	µg/l	< 5	82 - 140	21 - 31	6 - 14	2000	50	300
Quecksilber	µg/l	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	1	0,2	1
Zink	µg/l	< 5 - 7	13 - 34	< 5 - 29	< 5 - 10	5000	100	300
Chlorid	mg/l	75 - 93	4270 - 4700	970 - 2200	110 - 390	250	10	250
Cyanid	µg/l	< 5	< 5	< 5	< 5	50	< 10	20
Sulfat	mg/l	260 - 301	5400 - 5640	2600 - 3800	340 - 1700	240***	50	600
AOX	µg/l	35 - 267	480 - 570	20 - 120	< 20 - 61	-	-	-
DOC	mg/l	5,4 - 17,4	81 - 96	22 - 39	6,9 - 13	-	-	- ¹⁾
Phenolindex	µg/l	< 5 - 7	14 - 26	< 5 - 14	< 5	-	< 10	-
PAK (EPA)	µg/l	0,03 - 1,96	5,24	n.n. - 0,04	0,01	0,1	-	-

¹⁾ zur Erfahrungssammlung zu bestimmen; wird nicht zur Beurteilung herangezogen

LAGA 20* Mitteilungen der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 20: Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen – Technische Regeln – Ausgabe 1997, Zuordnungswerte für MV-Schlacke

n.a. nicht analysiert

n.n. nicht nachweisbar

*** geogen bedingte Überschreitungen bleiben in gewissen Grenzen außer Betracht

Möglichkeiten zur Optimierung von Sanierungsmaßnahmen an Flußdeichen

5 Untersuchungen zur Entwicklung neuartiger Sanierungsverfahren

Tabelle 5-6: Analyseergebnisse des Sickerwassers im Bereich des RC-Baustoffs, Grenzwerte der Trinkwasserverordnung (TrinkwV 2001) und Eluat-Zuordnungswerte der LAGA 20 (Az: 18063)

Parameter	Einheit	Einstau- wasser	1. Versuch 2. Versuch 3. Versuch			TrinkwV	LAGA 20*			
							RC-Baustoff			Boden
							Z 0	Z 1.1	Z 1.2	Z 0
pH-Wert	-	7,2 - 9,0	7,9 - 10,8	8,1 - 9,2	8,0 – 10,6	6,5-9,5	7-12,5			6,5-9
el. Leit- fähigkeit	mS/m	114 - 180	204 - 354	143 - 319	117 - 249	250	50	150	250	50
Nickel	µg/l	5	10 - 13	5 - 7	< 5	20	40	50	10	40
Arsen	µg/l	< 5	< 5 - 6	< 5	< 5	10	10	10	40	10
Blei	µg/l	< 5	< 5	< 5	< 2	10	20	40	100	20
Cadmium	µg/l	< 0,2 – 0,3	< 0,2 - 0,3	< 0,2	< 0,2	5	2	2	5	2
Chrom ges.	µg/l	< 5	9 - 14	7 - 14	7 - 20	50	15	30	75	15
Chrom VI	µg/l	< 10	< 10	< 10	n.a.	-	-	-	-	-
Kupfer	µg/l	< 5	9 - 14	8 - 11	< 5 - 7	2000	50	50	150	50
Quecksilber	µg/l	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,5	1	0,2	0,2	1	0,2
Zink	µg/l	< 5 - 7	< 5 - 23	< 5 - 6	< 5 - 8	5000	100	100	300	100
Chlorid	mg/l	75 - 98	54 - 490	170 - 500	110 - 160	250	10	20	40	10
Cyanid	mg/l	< 5	< 5 - 9	< 5	< 5	50	-	-	-	< 10
Sulfat	mg/l	260 - 301	310 - 361	170 - 370	280 - 360	240***	50	100	300	50
AOX	µg/l	< 20 - 267	70 - 96	< 20 - 386	20 - 63	-	-	-	-	-
DOC	µg/l	5,4 - 17,4	18,5 - 25	10 - 19	5,1 - 12	-	-	-	-	-
Phenol- index	mg/l	< 5 - 7	10 - 15	< 5 - 10	< 5 - 24	-	< 10	10	50	< 10
PAK (EPA)	µg/l	0,03 - 1,96	3,12	n.n. - 0,03	0,01	0,1	-	-	-	-

1) zur Erfahrungssammlung zu bestimmen, wird nicht zur Beurteilung herangezogen

LAGA 20* Mitteilungen der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 20: Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen – Technische Regeln – Ausgabe 1997, Zuordnungswerte für RC-Baustoff

n.a. nicht analysiert

n.n. nicht nachweisbar

*** geogen bedingte Überschreitungen bleiben in gewissen Grenzen außer Betracht

5.1.7 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

Die Untersuchungen zeigten, daß die verwendeten Sekundärrohstoffe (Baustoffrecycling-Material und Hausmüllverbrennungsschlacke) als Baustoffe für Flußdeiche geeignet sind und die Anforderungen an einen im Deichbau zugelassenen Baustoff nach DIN 19712 „Flußdeiche“ erfüllen. Neben der bautechnischen Eignung wurden dabei besonders die umweltrelevanten Aspekte berücksichtigt, da die eventuelle Auswaschung von Schadstoffen durch das Sickerwasser für eine zukünftige Umsetzung dieser Bauform in die Praxis des Deichbaus eine übergeordnete Rolle spielt. Die durchgeführten Versuche an dem Forschungsdeich zeigten, daß sich die Recyclingbaustoffe durch eine hohe Scherfestigkeit auszeichnen und hinsichtlich der Umweltverträglichkeit als unbedenklich einzustufen sind. Selbst der erhöhten Belastung durch den beschriebenen verstärkten Sickerwasseranfall, der auf Fehlstellen in der wasserseitigen mineralischen Dichtung zurückzuführen ist, konnte der Versuchsdeich unbeschadet widerstehen.

Die Bewertung der Umweltverträglichkeit der eingebauten MV-Schlacke und des RC-Baustoffs auf Basis der Grenzwerte der Trinkwasserverordnung zeigt, daß für das aus dem Versuchsdeich austretende Sickerwasser in Bezug auf die untersuchten Schwermetalle und organischen Parameter keine negativen Beeinträchtigungen zu erwarten sind. Die vorhandenen Überschreitungen der Grenzwerte der Trinkwasserverordnung bei den Parametern Sulfat, Chlorid und elektrische Leitfähigkeit, die hauptsächlich bei dem Sickerwasser aus dem mit MV-Schlacke errichteten Deichabschnitt zu beobachten waren, nahmen mit der Versuchsdauer deutlich ab.

Bei der vorgeschlagenen Bauweise des Versuchsdeichs, der mit einer oberflächen-nahen Tonabdichtung ausgestattet ist, muß zudem berücksichtigt werden, daß Sickerwasser nur bei langanhaltenden Hochwasserereignissen – und dies auch nur zeitlich begrenzt – freigesetzt würde. Die tatsächlich bei langanhaltenden Hochwasserereignissen aus den Recyclingmaterialien maximal freisetzbare Menge an löslichen Stoffen sollte zudem in Relation zu der Stofffracht gesehen werden, die zu diesem Zeitpunkt im Wasser des jeweiligen Vorfluters vorhanden ist: Durch die Überflutung von Industrie- und Siedlungsgebieten ist das Flußwasser während eines schweren Hochwasserereignisses in der Regel sehr stark belastet, so daß eine etwaige zusätzliche Anreicherung bei der Durchsickerung eines Deichkörpers als vernachlässigbar klein angesehen werden kann. Es muß vielmehr mit einer Kontaminierung des durchströmten Bodens durch belastetes Flußwasser gerechnet werden. Exemplarisch sind in Abbildung 5-38 die bei den Einstauversuchen gemessene Blei- und Arsenkonzentrationen den während des Elbehochwassers im August 2002 am Pegel Magdeburg gemessenen maximalen Mengen gegenübergestellt.

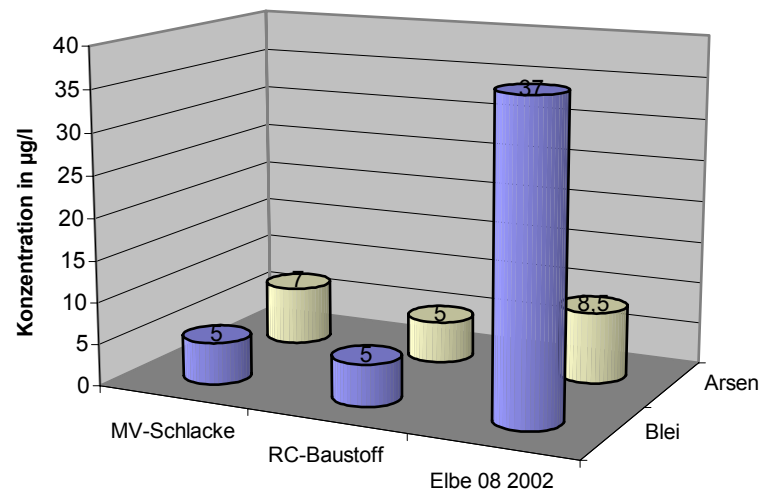


Abbildung 5-38: Maximale Blei- und Arsenkonzentration am Pegel Magdeburg während des Elbehochwassers 2002 (Krüger 2005)

Außerdem sollte eine eventuelle Anreicherung des Sickerwassers durch freisetzbare Chloride und Sulfate der Schonung natürlicher Ressourcen und dem ökonomischen Einsparpotential durch die Verwendung von Sekundärrohstoffen gegenübergestellt werden.

5.2 Maßnahmen zur Verbesserung der Erosionssicherheit von Deichen bei Überströmung

Ein generelles Problem bei Flußdeichen stellt deren Erosionsanfälligkeit bei Überströmungen dar. Da die Überschreitung der Bemessungswasserstände nicht ausgeschlossen werden kann, muß bei außerordentlich starken Hochwasserereignissen mit der Überströmung von Teilen der Deichlinie gerechnet werden, wenn auch das vorhandene Freibordmaß dem steigenden Wasserstand nicht genügt (Abbildung 5-39). Will man das Risiko eines aus der überströmungsbedingten Erosion resultierenden Deichbruchs minimieren, kommt man nicht umhin, die Deichkrone und die landseitige Deichböschung durch Deckwerke zu schützen. Derartige erosionssichere Böschungen von Deichen und Erddämmen sind abschnittsweise bei planmäßigen Überlaufstellen bereits vorhanden. Als Beispiele seien Überlaufschweller von ungesteuerten Poldern und Hochwasserentlastungsbauwerke von Dämmen genannt. In diesen Fällen sind die Überströmbereiche in der Regel durch Pflasterungen oder Betonbauwerke gesichert. Im Deichbau wäre jedoch für außerplanmäßige Überströmungen eine generelle Verbesserung der Erosionssicherheit angebracht, die aufgrund der Länge der Bauwerke und um die Versiegelung der landseitigen Böschung zu vermeiden mit den zuvor genannten Maßnahmen nicht sinnvoll ist. Eine geeignete Alternative stellen z. B. Geokunststoffe aufgrund ihrer guten Durchlässigkeit und teilweise sehr hohen Zugfestigkeit bei gleichzeitig vergleichsweise geringen Quadratmeterpreisen dar.



Abbildung 5-39: Beginn der Überströmung eines Flußdeichs

Für die Gestaltung eines funktionierenden Erosionsschutzes für Flußdeiche ist die hydraulische bzw. hydrodynamische Belastung bei Überströmung und gleichzeitiger Durchströmung des Deichkörpers entscheidend.

5.2.1 Versagensmechanismen an Deichen

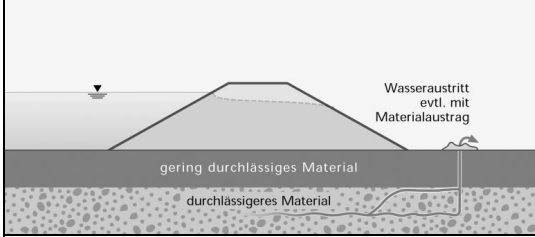
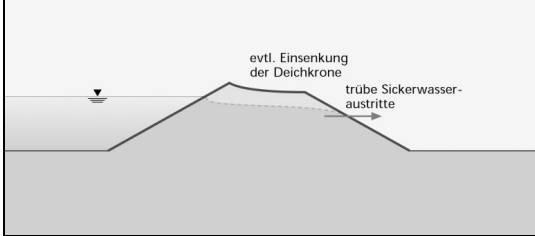
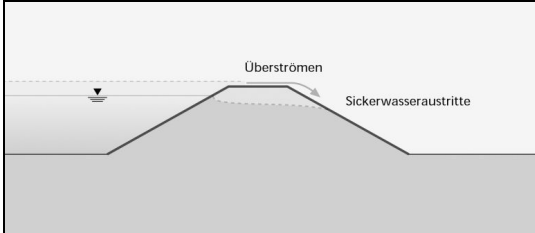
Man unterscheidet zwischen zahlreichen unterschiedlichen Versagensmechanismen, die bei Hochwassern zu Schäden am Deichkörper und letztendlich zu Deichbrüchen führen können. Maßgeblich für das Schadensbild sind einerseits die hydraulischen Randbedingungen, wie zeitlicher Verlauf der Hochwasserwelle (Geschwindigkeit des Wasserspiegelanstiegs und -abfalls, Dauer des Einstaus) und Höhe des Wasserstands, andererseits die Eigenschaften des Deichs (Zustand, Geometrie und Materialeigenschaften des Deichkörpers; Deichuntergrund). In Tabelle 5-7 sind die gängigsten Schadensbilder zusammengestellt.

Tabelle 5-7: Schadensbilder am Deich (nach RP Darmstadt 2006)

	<p>oberflächliche Beschädigung der wasserseitigen Böschung durch Wellenschlag, Treibzeug, Eis oder Strömung</p>
	<p>Rutschungen in der wasserseitigen Böschung durch Unterspülung des Deichfußes, Kolkbildung unter Wasser, Durchfeuchtung zu steiler Böschungen oder Strömungsdruck von innen bei schnell sinkendem Wasserspiegel</p>
	<p>Oberbodenrutschungen an der binnenseitigen Böschung durch zu hohe Sickerlinie bzw. Sickerwasseraustritt in der Böschung</p>
	<p>tiefgehende Risse und Rutschungen an der binnenseitigen Böschung durch Ausspülungen des Deichkörpers am landseitigen Böschungsfuß aufgrund zu dichten Materials an der Oberfläche oder durch hydraulischen Grundbruch</p>

Möglichkeiten zur Optimierung von Sanierungsmaßnahmen an Flußdeichen

5 Untersuchungen zur Entwicklung neuartiger Sanierungsverfahren

 <p>Wasseraustritt evtl. mit Materialaustrag</p> <p>gering durchlässiges Material</p> <p>durchlässigeres Material</p>	<p>Unterströmung des Deichkörpers mit Materialaustrag in Form von Quelltrichtern im Deichhinterland; Deckschicht steht unter Auftrieb Gefahr von Setzungen durch rückschreitende Erosion</p>
 <p>evtl. Einsenkung der Deichkrone</p> <p>trübe Sickerwasser- austritte</p>	<p>verstärkter Austritt von trübem Sickerwasser mit Materialaustrag in der binnenseitigen Böschung Gefahr der Kanalbildung (Piping) und Einsenkung der Deichkrone</p>
 <p>Überströmen</p> <p>Sickerwasseraustritte</p>	<p>Überströmung der Deichkrone und anschließende Erosion von landseitiger Böschung und Krone Breschenbildung bis hin zum kompletten Deichversagen</p>

Je nach Zustand der Deiche und Art des anstehenden Untergrunds sind die maßgebenden Versagensmechanismen regional unterschiedlich. Im hessischen Ried stellt beispielsweise die Unterströmung des Deichs, die infolge von rückschreitender Erosion zum Deichbruch führen kann, die Hauptgefahr dar. Die Deiche sind hier auf einer lediglich ein bis zwei Meter mächtigen Auelehmschicht gegründet, unter der die stark wasserdurchlässigen Sande und Kiessande des Rheingrabens anstehen. Dies wird durch das während extremer Hochwasserereignisse in weiten Bereichen des Deichhinterlandes austretende Qualmwasser deutlich (Abbildung 5-40).



Abbildung 5-40: Quelltrichter im Deichhinterland

Die meisten der oben dargestellten Schadensmechanismen stellen ein geotechnisches Standsicherheitsproblem dar, das aus der Belastung durch den hydrostatischen Druck auf der Wasserseite des Deichs und der Durchströmung des Deichkörpers resultiert. Die für die Standsicherheit des Deichs maßgebenden Größen bei langanhaltendem Einstau ohne Überströmung sind:

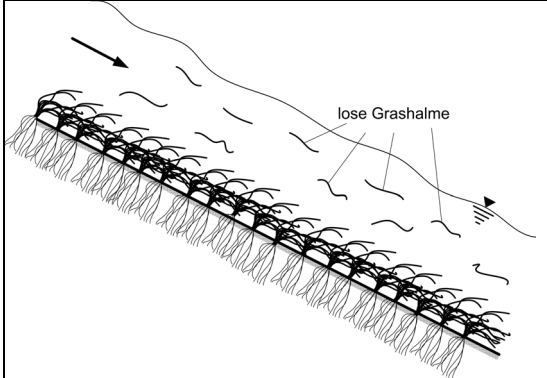
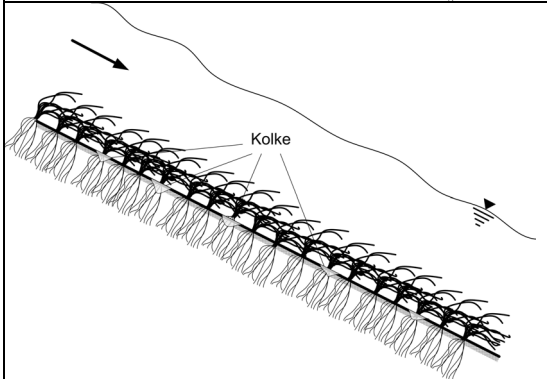
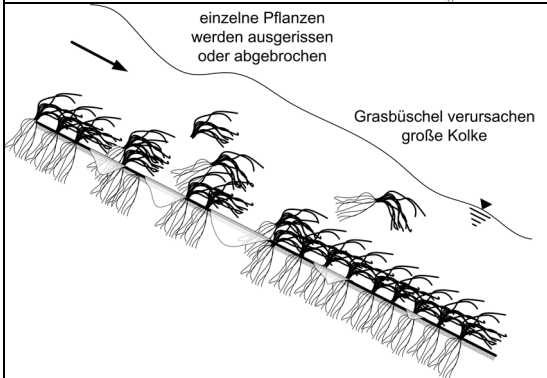
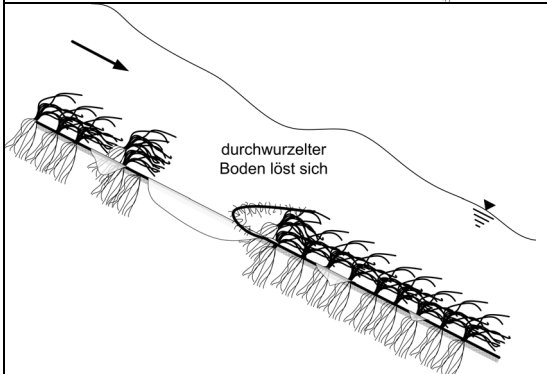
- Deichgeometrie
 - Deichhöhe H
 - Deichbreite B
 - Böschungsneigung H/B
- Bodenparameter des Deichs
 - Winkel der inneren Reibung φ'_D
 - ggf. Kohäsion c'_D
- Bodenparameter des Deichuntergrunds φ'_U, c'_U

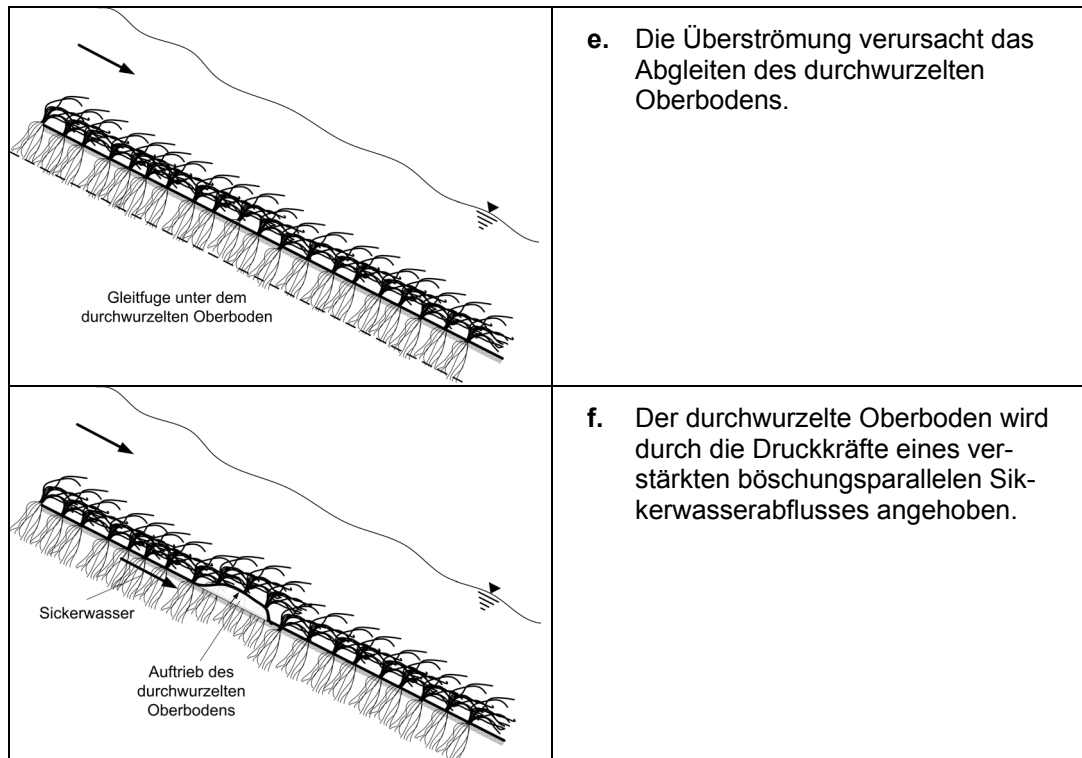
Bei der Überströmung eines Deichs hingegen ist die Widerstandsfähigkeit der Deckschicht entscheidend. Diese drückt sich in der kritischen (Sohl-)Schubspannung $\tau_{0, \text{krit}}$ aus (s. Abschnitt 5.2.5.1). Wird die Grenzscherubspannung überschritten, kommt es zum Erosionsbeginn der Deckschicht, die in der Regel aus einer Oberbodenschicht mit Grasnarbe besteht. Eine gut ausgebildete und gepflegte Grasnarbe stellt bereits einen wirksamen Erosionsschutz dar, da die Graswurzeln den Oberboden zusammenhalten und somit wie eine Bewehrung wirken. Die Bedeutung der Grasnarbe für die Widerstandsfähigkeit von Deichen wurde bereits früh erkannt. Bereits im 18. Jahrhundert wurde in dem Buch „Anfangs – Gründe der Deich- und Wasserbaukunst“ (Brahms 1767/1773) der „Bedeckung der Deiche“ ein eigenes Kapitel gewidmet, in dem die Saat von Grassoden als Erosionsschutz beschrieben wird.

Bei zunehmender Belastung durch die Strömung kann eine Grasnarbe jedoch keinen ausreichenden Schutz mehr bieten. Es sind dann unterschiedliche Erosionserscheinungen möglich, die auch vermischt auftreten können. In Tabelle 5-8 sind diese schematisch dargestellt.

Die überströmte Vegetation wird in Abhängigkeit der Pflanzenlänge zunächst in Strömungsrichtung umgelegt. Dabei kann lose Vegetation durch die Strömungskräfte mitgerissen werden (Tabelle 5-8 a). Lokal können um die Wurzeln der Graspflanzen Kolke entstehen (Tabelle 5-8 b), die den Halt der Pflanzen schwächen und schließlich zum Herausreißen einzelner Grasbüschel durch die Strömungskräfte führen (Tabelle 5-8 c). Hierdurch entstehen größere Kolke im Bereich des nun freigelegten Bodens.

Tabelle 5-8: Unterschiedliche Formen der Erosion einer überströmten Grasnarbe (nach CIRIA 1987)

	<p>a. Zu Beginn der Überströmung wird lose Vegetation durch die Strömungskräfte mitgerissen.</p>
	<p>b. Lokal können Kolke um die Wurzeln der einzelnen Grasbüschel entstehen. Hierdurch wird der Halt der Pflanzen geschwächt.</p>
	<p>c. Einzelne Graspflanzen mit schlecht ausgebildetem Wurzelwerk werden von der Strömung herausgezogen oder abgebrochen. Die Strömung verursacht enorme Zugkräfte auf herausstehende Pflanzen, im Vergleich zu flachgedrückten.</p>
	<p>d. Teile des durchwurzelter Oberbodens werden durch hohe lokale Zugkräfte „aufgerollt“.</p>



Neben der Erosion einzelner Graspflanzen kann es zu Ablösungen des durchwurzelten Oberbodens kommen. So kann die Überströmung steiler Grasböschungen z.B. zur Aufrollung von Teilen des durch Graswurzeln zusammengehaltenen Bodens führen (Tabelle 5-8 d). Die Schubkräfte können auch ein Abrutschen des gesamten durchwurzelten Oberbodens in einer flachen Gleitfuge bewirken (Tabelle 5-8 e). Bei verstärkt anfallendem böschungsp parallelen Sickerwasser zwischen Stützkörper und Oberboden, bzw. wenn der Oberboden nicht ausreichend entwässern kann, ist ein Auftrieb der durchwurzelten Bodenschicht möglich (Tabelle 5-8 f).

Wenn der blanke Boden nach Erosionsbeginn der Grasnarbe der Strömung ausgesetzt wird, ist eine rasch fortschreitende Erosion der landseitigen Böschung unvermeidlich, die in der Regel zur Breschenbildung und schließlich zum Deichbruch führt. Der Zeitpunkt, an dem der Boden direkt den Strömungskräften ausgesetzt ist, kann als Beginn des Versagens angesehen werden (CIRIA 1987). Um steile Böschungen, wie sie bei Flußdeichen vorhanden sind, bei Überströmung erosionssicher zu machen, sollten sie daher zusätzlich durch ein Deckwerk gesichert werden.

5.2.2 Deckwerke – Stand der Technik

Deckwerke sind im Wasserbau als Erosionsschutz von Böschungen weit verbreitet. Neben der Sicherung bei Überströmung bzw. der Sohlsicherung finden sie besondere Anwendung als Ufersicherung an Flußböschungen und Schutz von Seedeichen vor Wellenbelastung.

Die einfachste Form des Erosionsschutzes bei Böschungen stellt die Grasnarbe dar, die durch ein gut ausgebildetes Wurzelwerk den Oberboden zusammenhält. Je nach konstruktiver Umsetzung des Deckwerks kann die Grasnarbe eine unterstützende Funktion haben – das Deckwerk besteht also aus einer Bewehrung *und* der Grasnarbe – oder eine reine Opferschicht darstellen. Im zweiten Fall dient die Grasnarbe vorrangig als Element der landschaftlichen Integrität des Deckwerks. Bei Überströmung des Deckwerks wird in diesem Fall die Grasnarbe samt Oberboden abgetragen.

Im folgenden sind verschiedene gängige Arten von Deckwerken beschrieben.

5.2.2.1 Deckwerke in Lockerbauweise

Als Deckwerke in Lockerbauweise werden sämtliche Deckwerkstypen, die aus einzelnen, nicht zusammenhängenden Elementen bestehen, bezeichnet. Das Gegenstück hierzu bilden kohärente Deckwerke, die in Abschnitt 5.2.2.2 beschrieben werden.

▪ Pflasterungen und Steinsatz

Pflasterungen und gesetzte Steine bestehen aus gleichförmigen oder ungleichförmigen Steinen, die einlagig auf Kontakt kraftschlüssig gesetzt werden. Die Steine müssen ausreichend groß dimensioniert werden, um den angreifenden Schubkräften zu widerstehen. Da die einzelnen Steine untereinander nicht verkittet sind, ist das Deckwerk wasserdurchlässig und ein Druckausgleich zwischen Böschungskörper und Oberfläche möglich. Dies ist sowohl bei Wellenbelastung, als auch bei durchströmten Böschungen wichtig, um ein Abheben oder Aufreißen des Deckwerks zu verhindern. Steinsatz mit regelmäßigen, plattigen Steinen ist in Abbildung 5-41 schematisch dargestellt.

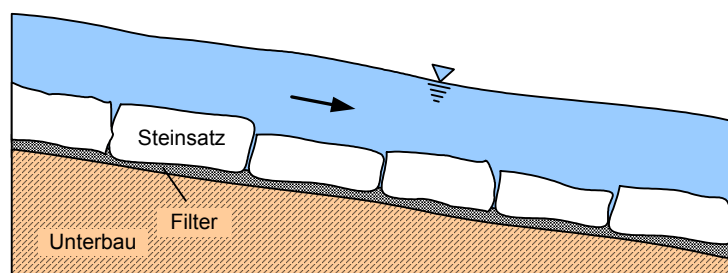


Abbildung 5-41: Prinzipskizze Steinsatz

Diese Form des Deckwerks ist nur für kurze Erosionsschutz- bzw. Überlaufstrecken, wie zum Beispiel Hochwasserentlastungen in Form einer Schußrinne über eine Dammkrone, geeignet, da Materialbedarf und Arbeitsaufwand beim Bau mit großen Kosten verbunden sind. Eine Begrünung dieses Deckwerktyps ist nicht vorgesehen.

▪ Steinschüttungen

Im Gegensatz zum Steinsatz werden bei Schüttungen die Steine lose in einer bestimmten Schichtdicke geschüttet (Abbildung 5-42). Daher besteht zwischen den in der Regel ungleichförmigen Steinen kein kraftschlüssiger Verbund, so daß es bei starker Strömungsbelastung zu Umlagerungen kommen kann. Somit ist bei derartigen Deckwerken mit der Ausbildung von Erosionsrinnen zu rechnen, was das Versagen des Bauwerks zur Folge haben kann. Auch diese Form der Böschungssicherung ist wasserdurchlässig und wird in der Regel böschungsparell durchströmt.

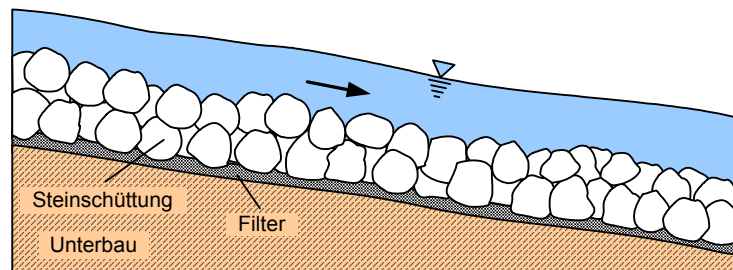


Abbildung 5-42: Prinzipskizze Steinschüttung

5.2.2.2 Kohärente Deckwerke

Unter kohärenten Deckwerken versteht man Oberflächensicherungen, deren Elemente fest miteinander verbunden sind. Maßgebend für die Stabilität und Erosionssicherheit ist hier der Verbund und nicht das Einzelelement. Als Verbindungselemente kommen vorrangig Bindemittel, wie Bitumen oder Zement, oder Ummantelungen aus Draht- bzw. Geogittern zum Einsatz.

▪ Geogittermatratzen und Gabionen

Geogittermatratzen bestehen aus Schüttsteinen, die durch eine Ummantelung aus Geogittern fest zusammengehalten werden. Sie sind in der Regel quaderförmig, um großflächig im Verbund verlegt werden zu können. Die einzelnen Matratzen werden untereinander verbunden. Die verwendeten Geogitter bestehen aus Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) oder Polyamid (PA).

Weit verbreitet sind auch baugleiche Elemente, die anstelle von Geogittern durch Maschendraht zusammengehalten werden. Man spricht hier auch von Gabionen. Neben der Anwendung als Erosionsschutz im Wasserbau werden Gabionen häufig zum Bau und der Stabilisierung steiler Böschungen verwendet.

▪ **Vollvergossene Deckwerke**

Vor allem im Küstenbereich sind vergossene Deckwerke aufgrund der starken Belastung durch die Brandungskräfte weit verbreitet. Es handelt sich dabei um lose Steinschüttungen, seltener auch um gesetzte Setzsteindecken aus Wasserbausteinen, die nachträglich vermörtelt werden. Beim sogenannten Vollverguß werden sämtliche Hohlräume des Deckwerks vollständig mit Vergußmörtel gefüllt, so daß bei Verwendung eines dichten Vergußmörtels ein geschlossenes, dichtes Deckwerk entsteht. Bei Vollverguß mit haufwerksporigem Beton (Filterbeton) ist jedoch auch bei Vollverguß die Herstellung eines durchlässigen Deckwerks möglich (EVU 1990).

Die Bemessung erfolgt für dichte Deckwerke für den Wasserüberdruck von der Unterseite, während durchlässige Deckwerke den Wasserüberdruck innerhalb des Bauwerks ohne Schaden abbauen.

▪ **Verklammerte Deckwerke**

Verklammerte Deckwerke werden ähnlich wie vollvergossene Deckwerke hergestellt. Hier wird die Deckschicht aus Setz- oder Schüttsteinen jedoch nur teilweise mit Vergußmörtel fixiert, so daß eine ausreichende Durchlässigkeit vorhanden bleibt, die mindestens das zehnfache der Durchlässigkeit der darunterliegenden Filterschicht betragen sollte (EVU 1990). Man spricht daher auch vom Teilverguß. Die Verklammerung dient dazu, ein Herauslösen einzelner Steine zu verhindern.

▪ **Mastix-Schotter-Deckwerke**

Als Mastix-Schotter wird ein mittels bituminösem Mörtel gebundener Einkornsplitt bezeichnet. Dieses im Wasserbau seit vielen Jahren im Bereich von Ufer- und Böschungssicherungen an Fließgewässern und im Küstenbereich eingesetzte Material zeichnet sich durch eine hohe Porosität aus, und führt somit bei der Anwendung als Deckwerk nicht zur Versiegelung der Oberfläche.

Das Bindemittel wird hier im Gegensatz zum Verguß bereits vor dem Einbau des Schotters mit dem Splitt in einem Mischwerk vermischt.

5.2.3 Geokunststoffe

Unter dem Oberbegriff Geokunststoff werden Produkte verstanden, bei denen mindestens ein Bestandteil aus synthetischem oder natürlichem Polymer hergestellt wurde, und die in Form eines Flächengebildes, eines Streifens oder einer dreidimensionalen Struktur im Bauwesen im Kontakt mit Boden und/oder anderen Baustoffen verwendet werden (Saathoff & Zitscher 2001, prEN 2000).

Die Geokunststoffe werden zweckmäßig in wasserdurchlässige und (nahezu) wasserundurchlässige Flächengebilde unterteilt (Abbildung 5-43).

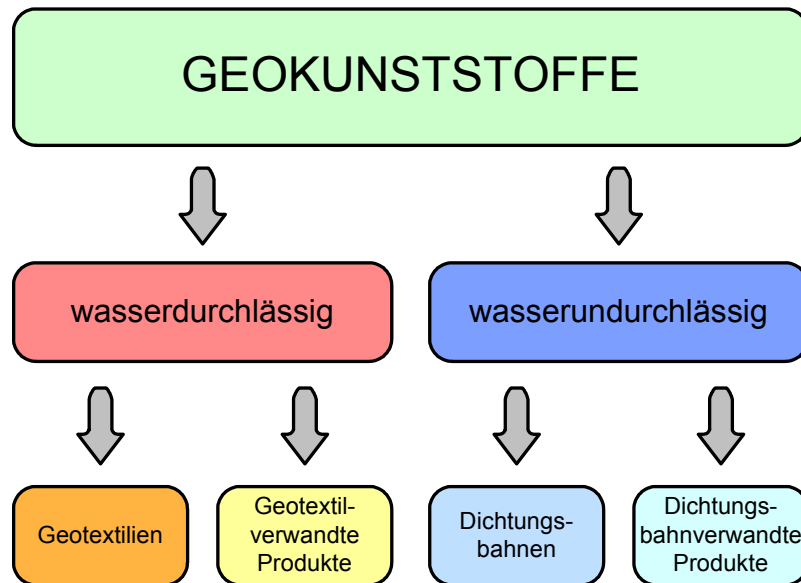


Abbildung 5-43: Untergliederung von Geokunststoffen (Saathoff & Zitscher 2001)

Geokunststoffe werden in den verschiedensten Bereichen des Grundbaus eingesetzt. Je nach Funktion bzw. Anwendungsbereich des Geokunststoffs unterscheidet man daher zusätzlich zwischen unterschiedlichen Produktgruppen. Unter anderem sind dies:

- Kunststoffdichtungsbahnen (KDB)
- Tondichtungsbahnen
- Geogitter
- Erosionsschutzmatten
- Vliesstoffe
- Kombinationen aus den o. g. Produkten

5.2.3.1 Einsatzgebiete von Geokunststoffen

Als Alternative zu klassischen mineralischen Dichtungen kommen sowohl Kunststoff- als auch Tondichtungsbahnen im Damm- und Deponiebau zum Einsatz. Trotz ihrer geringen Dicke zeichnen sie sich durch eine sehr gute Dichtwirkung aus. Der k_f -Wert einer faserarmierten geosynthetischen Tondichtungsbahn vom Typ Bentofix® (Naue GmbH & Co. KG) liegt z.B. bei 2×10^{-11} m/s. Der Vorteil von Tondichtungsbahnen, die aus Vliesstoffen mit einem eingebundenen quellfähigen Zusatz wie natürlichem Natriumbentonit bestehen, liegt in deren Flexibilität bei anhaltender Dichtwirkung. Bei geringfügigen Setzungen kommt es hier nicht zur Rißbildung, was bei herkömmlichen Tondichtungen ein enormes Schadenspotential darstellt.

Geogitter werden vorrangig zur Bewehrung von steilen Böschungen eingesetzt. Je nach Typ können sie Zugkräfte von über 40 kN/m aufnehmen.

Klassische Erosionsschutzmatten aus UV-stabilisiertem Polymer-Wirrgelege halten den durchwurzelten Oberboden zusammen und verhindern so Oberflächenerosion. Sie kommen vorrangig in steilen Böschungen zum Einsatz, wo durch Windangriff und Niederschlag mit Erosionserscheinungen zu rechnen ist.

Vliesstoffe finden ihre Anwendung in der Regel als Filterelement. Sie haben eine hohe Durchlässigkeit und trennen benachbarte Bodenschichten voneinander, um Auswaschungen und innere Erosion zu verhindern.

Der Einsatzbereich von Kombiprodukten ist sehr weit gestreut, da theoretisch eine fast beliebige Kombination der unterschiedlichen Produkte möglich ist. So dienen Geogitter im Verbund mit Vliesstoffen oftmals als Bewehrungselemente, die gleichzeitig durch ihre Filterwirkung eine Auswaschung von Bodenpartikeln verhindern sollen. Vliesstoffe in Verbindung mit Wirrgelegen werden als Dränmatten eingesetzt. Das sich zwischen zwei Lagen von Vliesmatten befindliche Wirrgelege schafft einen Freiraum zur Entwässerung.

In der folgenden Abbildung sind unterschiedliche Geokunststoffprodukte der Firma Naue GmbH & Co. KG, die für die oben beschriebenen Funktionen zum Einsatz kommen, dargestellt.

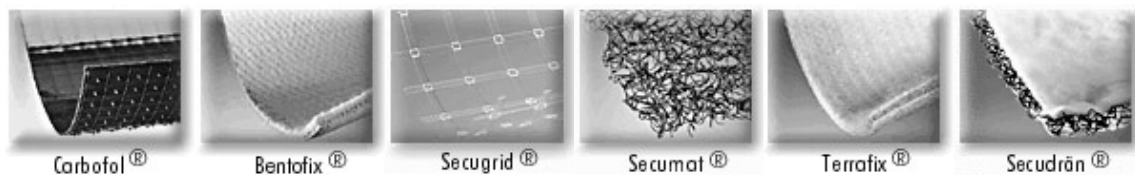


Abbildung 5-44: Geokunststoffe für verschiedene Anwendungen der Firma Naue: Kunststoffdichtungsbahn, Tondichtungsbahn, Geogitter, Erosionsschutzmatte, Vliesstoffmatte und Dränmatte (v. l. n. r.)

5.2.3.2 Verwendung von Geokunststoffen im Deich- und Dammbau

Auch im Deich- und Dammbau werden verschiedene Arten von Geokunststoffen bereits langjährig erfolgreich eingesetzt (Abbildung 5-45). Bei Sanierungen zeigt sich vor allem der große Vorteil, daß beispielsweise bei zu hoher Durchlässigkeit des Altdaichs durch das Einbringen von Dichtungsbahnen in die wasserseitige Böschung große Verbesserungen erzielt werden können und gleichzeitig nur wenig Erdbewegung notwendig ist. Da Transportkosten einen immer höheren Stellenwert bei der Kalkulation von Baukosten darstellen, sind Geokunststoffe gegenüber herkömmlichen Tondichtungen hier klar im Vorteil.

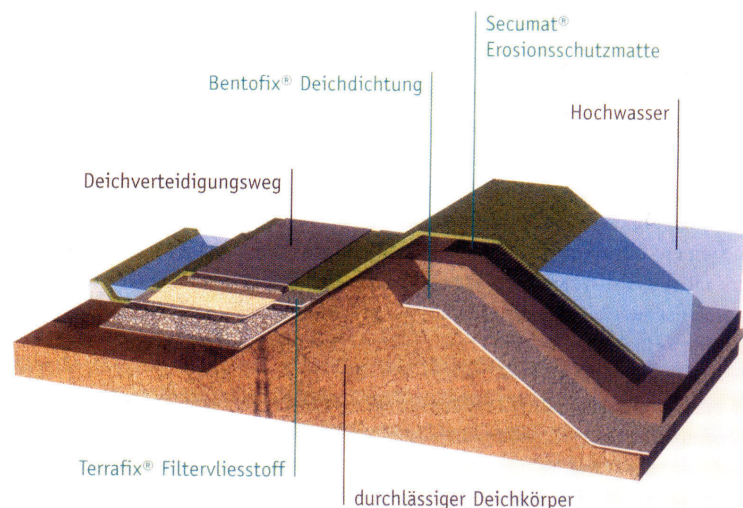


Abbildung 5-45: Verwendung von Geokunststoffen in verschiedenen Bereichen des Deichbaus (Naue GmbH & Co. KG)

Als Erosionsschutz werden im Wasserbau Geokunststoffe z.B. in der Wasserwechselzone von Uferböschungen eingesetzt, um das Auswaschen und Abrutschen von Bodenmaterial zu unterbinden. Nach Befüllen der offenen Struktur der Erosionsschutzmatten mit Mutterboden und Bepflanzung mit Gras entsteht aufgrund der kompletten Durchwurzelung ein widerstandsfähiges Deckwerk, das Erosionen durch Wellenschlag und Strömung reduziert.

Um einen zuverlässigen Erosionsschutz bei der Überströmung von Deichen oder Dämmen zu gewährleisten, sind die herkömmlichen Erosionsschutzmatten, die von verschiedenen Herstellern angeboten werden, jedoch nur bedingt geeignet. Aufgrund der enormen Belastung der landseitigen Böschung durch sehr große Strömungsgeschwindigkeiten und Sohlschubspannungen, sowie die starke turbulente Verwirbelung, ist hier mit Verformungen des gesamten Deckwerks zu rechnen. Durch die Kombination mit Geogittern kann der Zusammenhalt des Deckwerks und somit der Böschung deutlich verbessert werden. Da in diesem Bereich bisher keine praxisnahen Untersuchungen durchgeführt wurden, sind hydraulische Versuche notwendig, die ein derartiges Deckwerk den Belastungen einer starken und andauernden Überströmung aussetzen.

5.2.4 Hydraulische Untersuchungen zur Überströmungssicherheit von Deichen – Stand der Forschung

In den vergangenen Jahren wurden vermehrt Untersuchungen zur Verbesserung der überströmungsbedingten Erosionsanfälligkeit von Erddämmen durchgeführt. Die Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU, seit 1. Januar 2006 Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz (LUBW)) hat mit dem Leitfaden „Überströmbare Dämme und Dammscharten“ den wesentlichen aktuellen ingenieur-

wissenschaftlichen Kenntnisstand im Bereich der Überströmungssicherheit von Dämmen und Deichen zusammengestellt (LfU 2004). Der Leitfaden entstand auf Grundlage der Ergebnisse von Forschungsvorhaben der Universitäten Stuttgart (Institut für Wasserbau, Institut für Geotechnik) und Karlsruhe (Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik) im Rahmen des Programms „Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung (BWPLUS)“. Hier wird in erster Linie auf die Sicherung von Dämmen an Hochwasserrückhaltebecken abgezielt. Obwohl die Ergebnisse prinzipiell für überströmungssichere Deiche übertragbar sind, sind die hier vorgestellten Verfahren aufgrund des Aufwands und der damit verbundenen Kosten nur bedingt als generelle Sicherungsmaßnahmen von Deichen geeignet, sondern eher für örtlich begrenzte Überlaufstrecken. Im neuen DWA-Merkblatt DWA-M 507 (Deiche an Fließgewässern) wird daher darauf hingewiesen, daß die generelle überströmungssichere Gestaltung von Flußdeichen unwirtschaftlich sei. Dies verdeutlicht den vorhandenen Forschungsbedarf auf dem Gebiet kostengünstig realisierbarer Deckwerke.

Bei den Untersuchungen in Stuttgart wurden an der Versuchsanstalt für Wasserbau großmaßstäbliche Experimente mit erosionssicheren Lockerdeckwerken und Bodenverfestigungsmaßnahmen durchgeführt. Die Versuche mit Deckwerken in Lockerbauweise wurden in einer 7,5 m langen und 1,5 m breiten Laborrinne mit der Neigung 1:8 durchgeführt (FKZ: BWC 20004). Zunächst wurde durch einen 5 bis 30 cm starken Tonkeil eine Böschungsneigung von 1:6 hergestellt. Über einer Filterkieschicht mit Korndurchmesser 8/32 wurde ein Deckwerk in Form einer Steinschüttung mit Bruchsteinen aus Muschelkalk hergestellt. Es wurden Versuche mit Schütthöhen von 25 und 40 cm durchgeführt. Weiterhin wurden Rinnenversuche mit geogitterummantelten Steinmatratzen durchgeführt. Die untersuchten „Körbe“ hatten eine Höhe von 25 cm und wurden in den Längen 2,5 m, 5,0 m und 7,5 m hergestellt und in der oben beschriebenen, geneigten Rinne installiert. Beide Deckwerkstypen sind aufgrund des enormen Materialaufwands und aus landschaftlichen Gesichtspunkten für die generelle Sicherung von überströmbaren Deichen ungeeignet. Außerdem sind die Untersuchungen durch die vorhandene, im Vergleich zur gängigen Deichbaupraxis sehr geringe Böschungsneigung nicht für Flußdeiche übertragbar. Die Laborversuche zur Herstellung eines erosionssicheren Deckwerks durch Bodenstabilisierung wurden an einer 8 m langen und 80 cm breiten Rinne mit einer Längsneigung von 1:6 durchgeführt. Der in einem Mischer homogen aufbereitetet und mit Bindemittel stabilisierte Erdstoff wurde in etwa 30 cm tiefe Kästen mit Kantenlänge 100x60 cm eingebaut. Diese wurden zur Überströmung in der geneigten Rinne installiert. Auch hier ist aufgrund der vergleichsweise geringen Neigung der Rinne eine Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse auf den Deichbau nicht gegeben. Außerdem ist das hier gewählte Verfahren der Bodenverbesserung, bei dem das Bodenmaterial in einem Mischer mit dem Bindemittel versetzt wird, für die Praxis der Deichsanierung nicht relevant. Hier müßte das Bindemittel vielmehr im sogenannten Mixed-in-Place-

Verfahren (MIP) durch Auffräsen des Deichkörpers in den Erdstoff des Deichkörpers gemischt werden. Aus den Versuchsergebnissen gehen zudem keine Aussagen zur Veränderung der Durchlässigkeit des Bodenmaterials durch das Einmischen von Bindemittel hervor. Für die Standsicherheit von Deichen ist jedoch eine gute landseitige Entwässerung von entscheidender Bedeutung, da sonst die Gefahr eines Böschungsbruchs durch die von innen wirkenden Wasserdruckkräfte besteht. Durch die verkittende Wirkung des zugemischten Bindemittels ist die Reduzierung der Durchlässigkeit zu erwarten.

Die von der Abteilung Erddamm- und Deponiebau am Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik sowie dem Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik (IWK) der Universität Karlsruhe (TH) durchgeführten Untersuchungen beschäftigten sich mit kohärenten, selbsttragenden und dränfähigen Deckwerken in Form von Mastix-Schotter-Deckwerk und Deckwerk aus verbundenen Rasengittersteinen, sowie Verbundlösungen mit Geotextilien, die als „Schlaufenvariante“ und „Schlauchvariante“ untersucht wurden (FKZ: BWC 20005 und BWT 22004). Die Versuche zur Ermittlung der hydraulischen Belastungsgrenzen des kohärenten Deckwerks aus Rasengittersteinen wurden in einer Kipprinne des Theodor-Rehbock Laboratoriums des IWK durchgeführt. Die 4 m lange Rinne hat eine Breite von 1,65 m und konnte in der Neigung zwischen 0° und 35° verstellt werden. Es wurden Versuche mit Neigungen von 1:10, 1:6, 1:4 und 1:3 durchgeführt. Der maximale spezifische Abfluß betrug 0,3 m³/s/m. Die Rasengittersteine wurden auf Betongehwegplatten verlegt und mit Stahlklammern untereinander verbundenen. Um verschiedene Oberflächenrauheiten zu erzeugen wurden neben ungefüllten Rasengittersteinen auch mit oberflächenbündiger Füllung, mit 3 cm überstehenden Füllsteinen und mit 10 cm überstehenden Füllsteinen versehene Rasengittersteine eingesetzt. Die Versuche ergaben, daß für die Neigung von 1:3 sämtliche Deckwerkvarianten versagten. Eine Anwendung für den Deichbau ist mit diesem Deckwerkstyp somit weder möglich, noch erscheint sie hinsichtlich des Materialaufwands bzw. der Herstellungskosten sinnvoll. In weiteren Versuchen wurde ein Deckwerk aus Mastix-Schotter – einem mittels bituminösem Mörtel gebundenem Einkornsplitt – untersucht. Die Untersuchungen wurden zunächst in der oben beschriebenen Kipprinne und später an einem Halbdamm-Modell durchgeführt. In den Modellversuchen mit Maßstab 1:2 bis 1:4 wurde die binnenseitige Dammböschung nachgebildet. Die Modellhöhe betrug etwa 1,40 m bei einer Böschungsneigung von 1:6 und hatte eine Breite von 1,50 m. Der maximale spezifische Abfluß betrug 0,3 m³/s/m. Aufgrund der hier untersuchten Geometrie, die eine Anwendung als Deckwerk für überströmbare Dämme zur Hochwasserentlastung vorsieht, ist eine generelle Übertragung für den Deichbau nicht möglich, da hier deutlich steilere Böschungen vorhanden sind. Hier wären zusätzliche Untersuchungen notwendig. Außerdem wären zusätzliche In-Situ-Versuche angebracht, da eine Verfälschung der Ergebnisse durch Randeffekte wie Reibung bzw. Haftung bei der sehr schmalen Abmessung des Versuchsaufbaus nicht ausgeschlossen werden können.

Die ebenfalls in Karlsruhe durchgeführten Untersuchungen zu Verbundbauweisen beschäftigten sich mit der Böschungssicherung mittels geotextiler Schläuche und Schlaufen, die den Dammkern bei Überströmung vor Erosion schützen sollen. Die Auflage des Bodenmaterials über den Geotextilien stellt in diesem Fall eine Opferschicht dar, die durch die Strömungskräfte erodiert werden würde. Bei den Modellversuchen im Maßstab 1:2,5 wurden zunächst Untersuchungen an einem hydraulischen Treppenmodell aus Beton durchgeführt. Weiterhin wurde in einer 1,35 m breiten Laborrinne ein Halbdamm-Modell aus Sand, der durch schlaufenförmig verlegtes Geogewebe fixiert wurde, in Überströmungsversuchen untersucht. Hier lag ebenfalls ein Modellmaßstab von 1:2,5 vor. Die letzte untersuchte Variante waren mit Sand bzw. Beton gefüllte Geogewebebeschläuche, die einzeln oder als Batterievariante mit drei Schläuchen in einer Laborrinne überströmt wurden. Diese Erosionsschutzvariante wird auch im Küstenbereich zum Schutz von Dünen eingesetzt. Für den Deichbau erscheinen diese Verbundbauweisen nur bedingt geeignet, da das Verformungsverhalten derartiger Bauwerke aufgrund der Einbautechnik in der Praxis (Füllen der Schläuche durch die Einspülung eines Sand-Wasser-Gemischs) ungewiß bis bedenklich ist. Zudem ist die nachträgliche Anwendung im Rahmen einer Sanierung nicht möglich, da sich die Bewehrungselemente im Deichkern befinden und somit der gesamte Deichkörper zunächst abgetragen werden müßte.

In England wurden bereits in den 80er Jahren Untersuchungen zur Widerstandsfähigkeit von bewehrten und unbewehrten Grasböschungen bei Überströmung durchgeführt (CIRIA 1987). Hier wurde besonders die stabilisierende Wirkung der Grasnarbe beleuchtet, welche die grundlegende Form der Erosionssicherung darstellt. Dieser „natürliche“ Erosionsschutz kann durch eine zusätzliche Bewehrung unterstützt werden. In den englischen Untersuchungen erfolgte die Bewehrung durch Geotextilien und Beton. Hierzu wurden neben Laborversuchen naturmaßstäbliche Feldversuche am Jackhouse Reservoir durchgeführt. Es wurden Überströmungsversuche an einem nur mit einer Grassohle ausgestatteten Kanal, sowie an neun bewehrten Graskanälen vorgenommen. Als Bewehrung kamen Ortbeton, mit Draht verbundene und lose Betonblöcke, bitumengebundene dreidimensionale Geotextilmatten, offene dreidimensionale Geotextilmatten, zweidimensionale Geogitter und gewobene Geotextilien zum Einsatz. Die 25 m langen Graskanäle mit einem Längsgefälle von 1:2,5 hatten eine Sohlbreite von 1 m und 0,7 m hohe Böschungen, die 1:1 geneigt waren. Die Untersuchungen zeigten eine deutliche Verbesserung der Erosionssicherheit von Grasböschungen durch die Bewehrung mit Geokunststoffen.

Überströmungsversuche an einem Deich im Naturmaßstab und mit der üblichen Geometrie von Flußdeichen, die das Überschreiten der Bemessungswasserstände während extremer Hochwasserereignisse simulieren, wurden bisher nicht durchgeführt.

Die Überströmung des Versuchsdeichs auf voller Länge würde trotz des zur Verfügung stehenden Abflusses von knapp $5 \text{ m}^3/\text{s}$ zu recht geringen Überstauhöhen führen (s. Abschnitt 5.2.5.1). Somit wäre die hydraulische Belastung in den Versuchen im Vergleich zu der tatsächlich bei einem extremen Hochwasserereignis möglichen recht gering. Außerdem würde die Überströmung in den Bereichen der stirnseitigen Spundwand zu störenden Randeffekten führen, wie etwa einer verstärkten Auskolkung. Die Überströmung des Deichs wird daher auf zwei vordefinierte Überströmungsbereiche beschränkt, die in aufeinanderfolgenden Versuchen jeweils einzeln überströmt werden können. Die Bereiche der Krone, die bei der Durchführung eines Versuchs nicht überströmt werden sollen, sind durch Sandsäcke gesichert. In mehreren Versuchsdurchgängen werden die beiden Überströmbereiche durch verschiedene Deckwerke gesichert. Eine schematische Darstellung des Deichs mit den beiden Überströmungsbereichen ist in Abbildung 5-47 dargestellt.

Die Überströmbereiche haben im Bereich der Krone eine Breite von 20 m, wobei der mit Deckwerke versehene Abschnitt der binnenseitigen Böschung auf einer Breite von 22 m gesichert ist. Durch Variation der Überströmbreite wird die Überstauhöhe respektive die hydraulische Böschungsbelastung bei konstantem Abfluß geregelt. Dies wird mittels Sandsäcken bzw. sogenannten „Bigpacks“ realisiert.

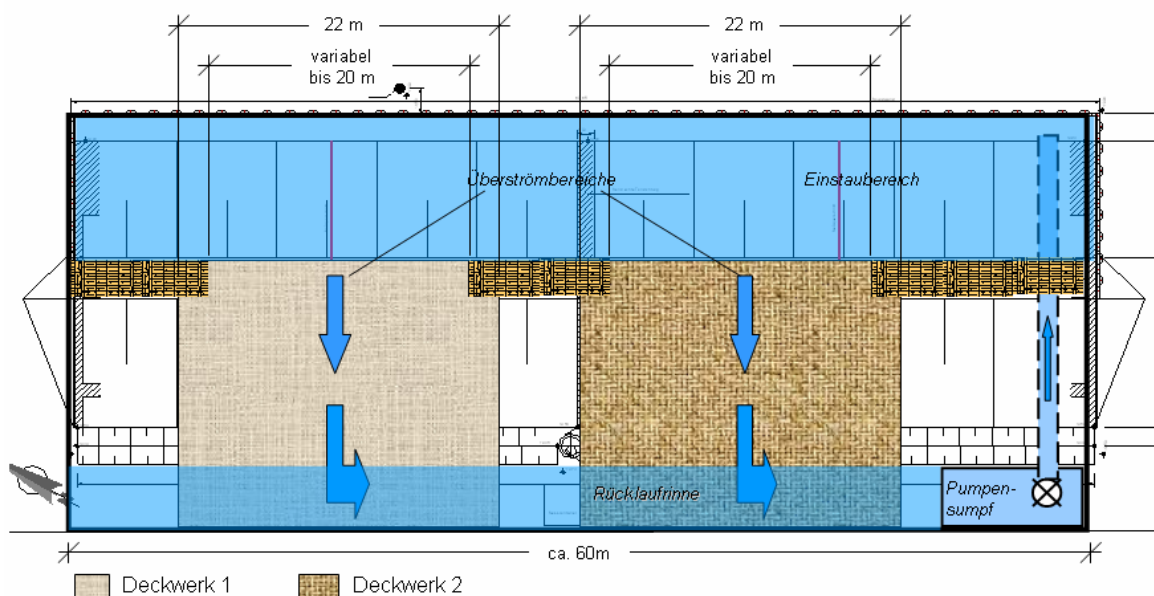


Abbildung 5-47: Draufsicht des Versuchsdeichs mit vordefinierten Überströmungsbereichen, schematisch

5.2.5.1 Hydraulik der Deichüberströmung

Werden bei einem Hochwasserereignis Deiche überströmt, ähnelt dies hydraulisch einer seitlichen Hochwasserentlastung über ein Streichwehr, da die Überströmung senkrecht zur Hauptströmungsrichtung im Gewässer stattfindet. Die über die Deichkrone abgeführte Wassermenge ist dabei von der Überströmungslänge und der Überstau- bzw. Überfallhöhe abhängig, wobei zu beachten ist, daß die Überstauhöhe nur eine begrenzte Größe erreichen kann, da der Wasserstand im Hauptgewässer mit zunehmender seitlicher Entlastung nicht beliebig ansteigen kann.

Zur Abschätzung der für sinnvolle Überströmungshöhen im Versuch benötigten Durchflußmengen kann die Hydraulik der Deichüberströmung durch Berechnung nach den gängigen Überfallformeln ermittelt werden. Während sich für die Berechnung der Überfallhöhe bei (Stau)dämmen die Überfallformel für vollkommenen Überfall nach Poleni (vgl. LfU 2004) eignet, ist bei überströmten Deichen die Anwendung der leicht modifizierten Überfallformel für parallel angeströmte Überfälle (Streichwehre) sinnvoller. Auch im oben beschriebenen Versuchsaufbau erfolgt die Anströmung aufgrund der Pumpenanordnung am Rand des Einstaubereichs deichparallel, so daß es zu einem leichten Abfallen der Überfall- bzw. Überstauhöhe h_u im Verlauf der Überströmkante kommt. Die mittlere Überfall- bzw. Überstauhöhe h_m ist hier der mittlere vertikale Abstand zwischen Deichkrone und Wasserspiegellage vor dem Überfall, d.h. h_u gemittelt über die Überströmlänge L (Abbildung 5-48).

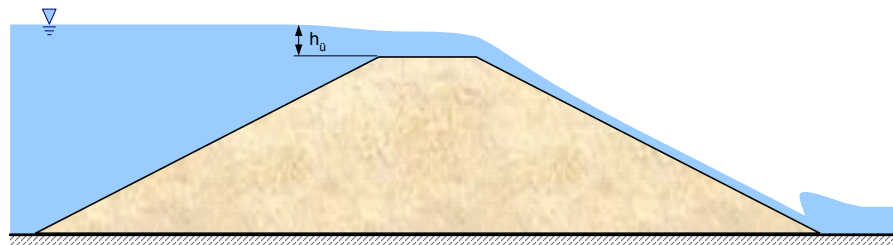


Abbildung 5-48: Vollkommener Überfall über einen Deich, schematisch

Die Länge L des Streichwehrs entspricht dabei der Länge des Überströmbereichs der Deichkrone (s. Abbildung 5-49), wenn es sich um eine abschnittsweise Deichüberströmung handelt.

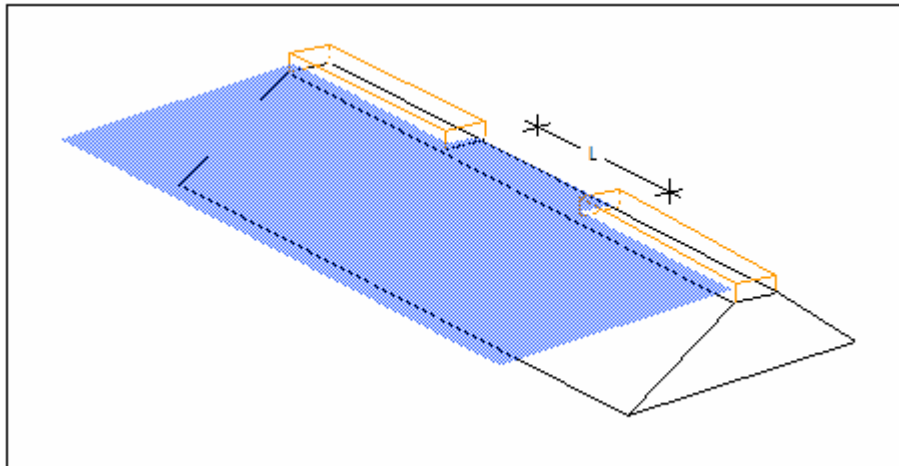


Abbildung 5-49: Annäherung der Deichüberströmung als Streichwehr

Der Abfluß Q über die Deichkrone berechnet sich in Abhängigkeit der Überfalllänge L und der mittleren Überfallhöhe h_m zu:

$$Q = \frac{2}{3} \mu_s \cdot L \cdot \sqrt{2g} \cdot h_m^{3/2} \quad (2)$$

mit Q : Abfluß in m^3/s
 μ_s : Überfallbeiwert (dimensionslos)
 L : Überfalllänge bzw. Breite des überströmten Bereichs in m
 g : Erdbeschleunigung = $9,81 \text{ m/s}^2$
 h_m : mittlere Überfallhöhe in m

Der Überfallbeiwert μ_s errechnet sich aus dem μ -Wert von frontal angeströmten geraden Überfällen zu:

$$\mu_s \approx 0,95\mu \quad (3)$$

mit $\mu \approx 0,75$

folgt $\mu_s \approx 0,7125$

In Abbildung 5-50 ist die so berechnete mittlere Überstauhöhe h_m in Abhängigkeit vom Abfluß Q für verschiedene Überströmlängen L dargestellt.

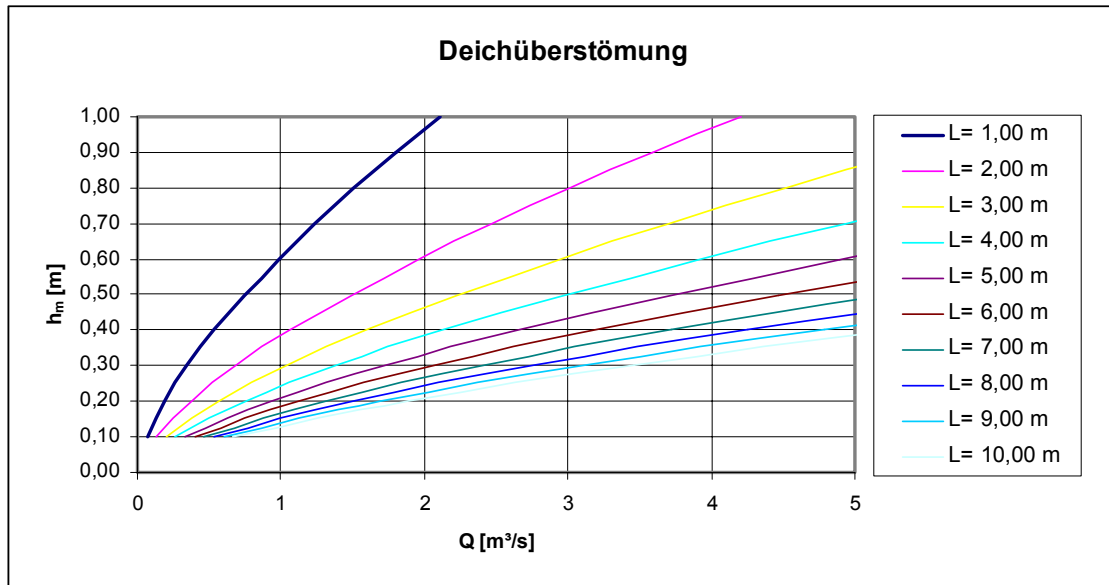


Abbildung 5-50: Überstauhöhe in Abhängigkeit vom Abfluß für unterschiedliche Überströmlängen

Um Randeffekte bei den Überströmbereichen zu reduzieren und die Deichüberströmung möglichst naturnah zu gestalten, sollte die Überströmlänge bei den Versuchen nicht zu kurz gewählt werden. Für den durch die zur Verwendung kommende Pumpe vorgegebenen Gesamtabfluß über die Deichböschung von $Q=4,87\text{ m}^3/\text{s}$ ergeben sich die im Diagramm in Abbildung 5-51 dargestellten mittleren Überstauhöhen h_m in Abhängigkeit der Überströmlänge L .

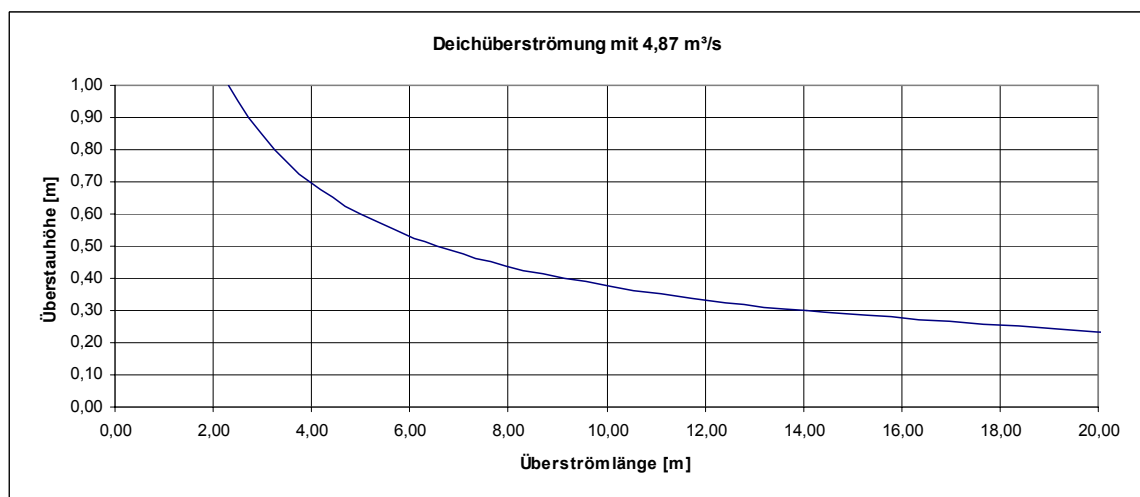


Abbildung 5-51: Überstauhöhe in Abhängigkeit der Überströmlänge bei einem Abfluß von $4,87\text{ m}^3/\text{s}$

Für die Belastung der landseitigen Deichböschung sind die dortigen Abflußzustände entscheidend. Diese sind vorrangig von der Rauheit und der Böschungsneigung abhängig. Charakteristisch ist eine geringe Anströmgeschwindigkeit vor der Deichkro-

Möglichkeiten zur Optimierung von Sanierungsmaßnahmen an Flußdeichen

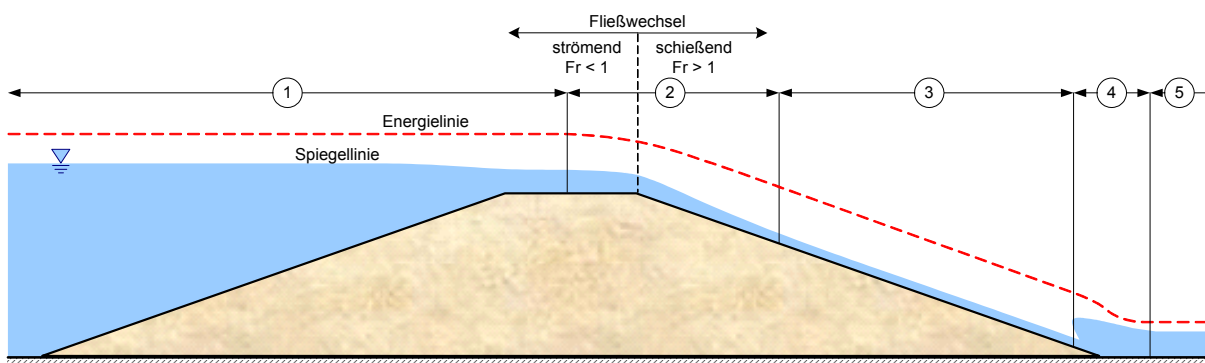
5 Untersuchungen zur Entwicklung neuartiger Sanierungsverfahren

ne, ein Fließwechsel von strömendem zu schießendem Abfluß im Bereich der landseitigen Deichschulter und schießender Abfluß mit hoher Energieumwandlung und Lufteintrag im Bereich der Böschung mit einem anschließenden Wechselsprung hinter dem Deichfuß (Abbildung 5-52). Bei einer rauhen Böschungsoberfläche ist im Anschluß an den ungleichförmigen Beschleunigungsabschnitt im oberen Bereich der Böschung von einem recht langen Abschnitt mit Normalabflußverhältnissen auszugehen (Abschnitte 2 und 3 in Abbildung 5-52) (vgl. CIRIA 1987 und LfU 2004).

Das Maß für den Fließzustand ist die Froude-Zahl. Diese ist definiert als:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot h}} \quad (4)$$

mit Fr : Froude-Zahl (dimensionslos); <1 strömend, >1 schießend
 v : Fließgeschwindigkeit in m/s
 g : Erdbeschleunigung = $9,81 \text{ m/s}^2$
 h : Fließtiefe in m



Energielinienabschnitte:

- | | | | |
|------------------|---|-----------------|---|
| ① Zuströmbereich | horizontale Energielinie, keine Energieverluste | ④ Wechselsprung | großes Energieliniengefälle, hohe Energieumwandlung |
| ② Beschleunigung | Zunahme der Energieverluste, Fließwechsel von strömend nach schießend | ⑤ Ablaufbereich | große Abflußtiefe, niedrige Fließgeschwindigkeit |
| ③ Normalabfluß | Energielinie und Spiegellinie parallel | | |

Abbildung 5-52: Querschnitt eines überströmten Deichs mit Fließzuständen

Die Fließtiefe auf der landseitigen Deichböschung kann für den Abschnitt, in dem Normalabflußbedingungen herrschen, mit der empirischen Manning/Strickler-Gleichung (5) für verschiedene Abflüsse Q angenähert werden:

$$Q = k_{St} \cdot R_{hy}^{\frac{2}{3}} \cdot I_E^{\frac{1}{2}} \cdot A \quad \text{in m}^3/\text{s} \quad (5)$$

mit k_{St} : Stricklerbeiwert in $\text{m}^{1/3}/\text{s}$

R_{hy} : hydraulischer Radius in m

I_E : Energieliniengefälle (dimensionslos)

A : Fließquerschnitt in m^2

Die Fließformel nach Manning/Strickler ist gültig für turbulente Gerinneströmungen im rauhen Bereich.

Im Bereich des Normalabflusses entspricht das Energieliniengefälle dem Sohlgefälle, hier also der Böschungsneigung von 1:2,5.

Der Stricklerbeiwert k_{St} ist ein Maß für die Sohlrauheit, die von der Beschaffenheit der Sohloberfläche abhängt. Bei der Überströmung grasbewachsener Oberflächen ist der Beiwert von den physikalischen Eigenschaften der Grasnarbe, wie Höhe, Dichte und Steifigkeit der Grashalme, abhängig. Außerdem spielt die Interaktion mit der Strömung eine große Rolle. In Abhängigkeit der hydraulischen Belastung kann hier in drei unterschiedliche Fälle unterschieden werden (CIRIA 1987):

- Die Fließtiefe ist deutlich geringer als die Höhe der Vegetation, die durch die Strömung nicht umgelegt wird. Die Fließgeschwindigkeiten sind hier gering.
- Erhöhte Fließgeschwindigkeiten und Fließtiefe verursachen das Umlegen und Schwingen der Vegetation durch die Strömung.
- Die Fließgeschwindigkeit ist groß genug, um die Vegetation flachzulegen. Hierdurch entsteht eine vergleichsweise glatte Oberfläche. Dieser Fall ist maßgebend für steile Gerinne und überströmte Böschungen.

Aufgrund der oben beschriebenen Phänomene ist die hydraulische Rauheit und somit der für die Berechnung anzusetzende Stricklerbeiwert einer grasbewachsenen Deichböschung stark von der Böschungsgeometrie (Steilheit) abhängig.

Die am US Department of Agriculture Stillwater Laboratory in Oklamhoma entwickelte sogenannte *VR-Methode* wird für die Bestimmung von Rauheitsbeiwerten bei grasbewachsenen Böschungen flacher als 1:10 empfohlen (Palmer 1945). Hier wird in einer empirischen Beziehung der Manning-Beiwert n (der Kehrwert des Stricklerbeiwerts k_{St}) in Abhängigkeit eines hydraulischen Parameters VR für verschiedene Graslängen dargestellt (Abbildung 5-53). Die physikalischen Eigenschaften der Vegetation sind je nach durchschnittlicher Länge der Grashalme in die drei Bereiche C (150 mm bis 250 mm), D (50 mm bis 150 mm) und E (kürzer als 50 mm) unterteilt. Der hydraulische Parameter VR entspricht bei hydraulisch breiten Gerinnen dem spezifischen Abfluß q (Abfluß pro laufenden Meter Deichüberströmung). Dies ist der

Fall, wenn die Strömungsgeschwindigkeit in der Mitte des Gerinnes nicht durch die Randreibung beeinträchtigt wird, was bei Deichüberströmungen der Fall ist.

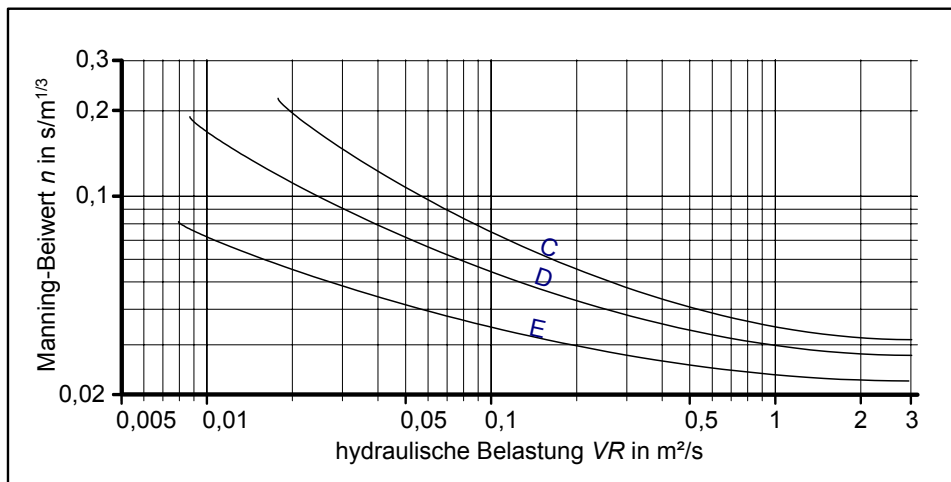


Abbildung 5-53: Hydraulische Rauheit von Gras (CIRIA 1987)

Bei Böschungsneigungen größer als 1:10 wird das Gras unabhängig von der hydraulischen Belastung immer flachgedrückt. Der Rauheitsbeiwert ist hier nach den in England durchgeführten Feldversuchen nur noch von der Böschungsneigung abhängig. Für Neigungen von 1:3 und steiler wird hier ein Manning-Beiwert von $n=0,020 \text{ s/m}^{1/3}$ angegeben, was einem Strickler-Beiwert von $k_{st}=50 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ entspricht (CIRIA 1987).

Um eine Abschätzung der hydraulischen Belastung der Deichböschung im Falle der Überströmung vorzunehmen, kann für den Böschungsabschnitt, in dem schießender Normalabfluß herrscht (Abbildung 5-52, Bereich 3), durch Iteration mittels Gleichung (5) die Fließtiefe bei Überströmung bestimmt werden.

Für die Geometrie des Versuchsdeichs mit einer Böschungsneigung von 1:2,5 sind in Abbildung 5-54 die Fließtiefe h und die mittlere Fließgeschwindigkeit v_m über der landseitigen Böschung für einen Strickler-Beiwert von $k_{st}=50 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ in Abhängigkeit vom spezifischen Abfluß q dargestellt.

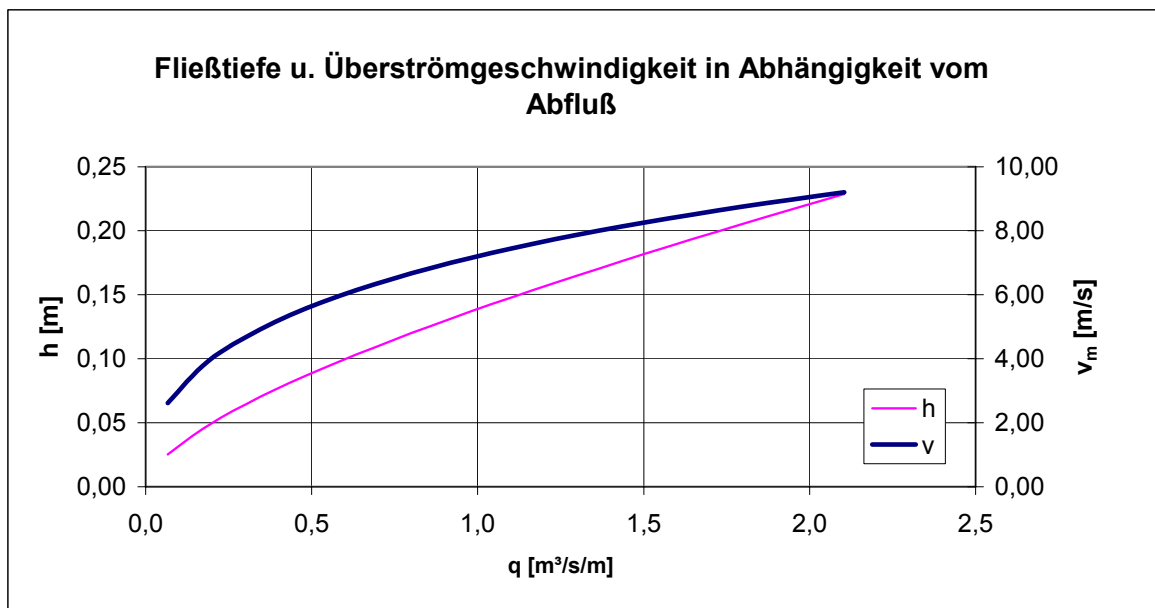


Abbildung 5-54: Fließtiefe und mittlere Überströmungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom spezifischen Abfluß

Maßgebend für die Erosion der überströmten Oberfläche und somit für die Bemessung des Deckwerks ist die aus der Überströmung resultierende Sohlschubspannung τ_0 . Diese errechnet sich aus dem Gefälle und der Fließtiefe:

$$\tau_{0(\text{Sohle})} = \rho \cdot g \cdot h \cdot I_E \cdot \cos \alpha \quad \text{in N/m}^2 \quad (6)$$

- mit
- ρ : Dichte des Wassers in kg/m³
 - g : Erdbeschleunigung = 9,81 m/s²
 - h : Fließtiefe in m
 - I_E : Energieliniengefälle (dimensionslos)
 - α : Böschungsneigung

Eine ungesicherte bzw. unbewehrte Grassohle kann nach Literaturangaben bei längerfristiger Belastung lediglich Schubspannungen bis zu 18 N/m² standhalten, bei kurzfristiger Belastung bis zu 30 N/m² (Schneider Bautabellen). In Tabelle 5-9 sind Erfahrungswerte der kritischen Sohlschubspannung $\tau_{0, \text{krit}}$ von verschiedenen Sohlenmaterialien und Sohlenschutzschichten zusammengestellt.

*Tabelle 5-9: Erfahrungswerte der kritischen Sohlschubspannung $\tau_{0, krit}$
(aus Schneider Bautabellen, 1994)*

Sohlenmaterial bzw. Sohlenschutzschicht	$\tau_{0, krit}$ in N/m ²
festgelagerter Sand bzw. feiner Kies	8 bis 10
kolloider Lehm und Ton	10 bis 12,5
Kies, d = 5 bis 10 mm	12,5
Kies, d \approx 15 mm	15 bis 20
Geröll, d \approx 50 mm	30 bis 40
Geröll, d = 50 bis 100 mm	40 bis 60
Rasen, kurzfristig belastet	20 bis 30
Rasen, längerfristig belastet	15 bis 18
Spreutlage	30 bis 40
Rauhwehr	40
Pflaster, je nach Dicke	70 bis 200
Packwerk, Oberfläche gepflastert	170

Zur Prognose der in den Überströmungsversuchen am Forschungsdeich in Biebesheim auftretenden Sohlschubspannungen im Normalabflußbereich der landseitigen Böschung kann mit Gleichung (6) der in Abbildung 5-55 dargestellte Verlauf berechnet werden. Das Energieliniengefälle I_E entspricht hier dem Sohlgefälle I_S und somit der Böschungsneigung von 1:2,5 bzw. 0,4.

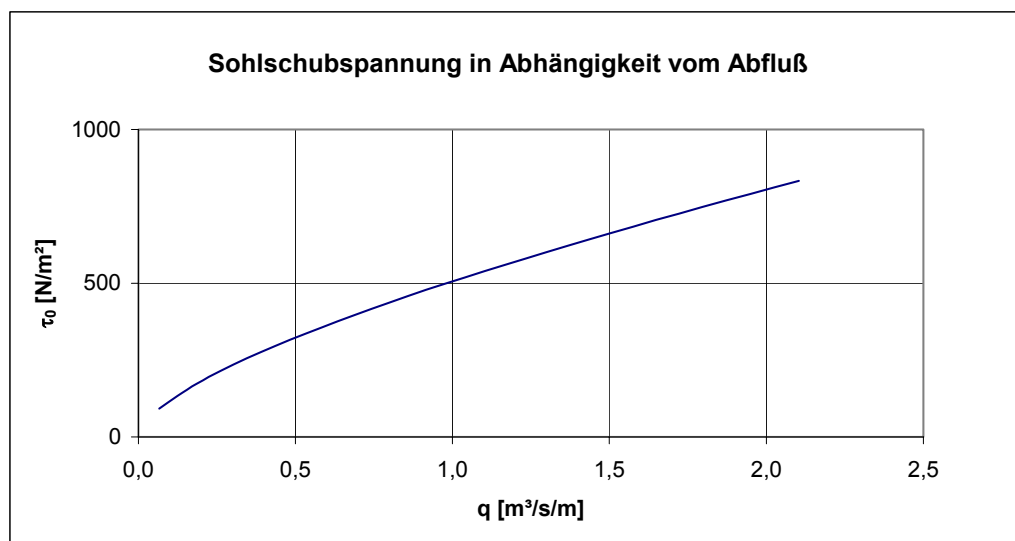


Abbildung 5-55: Sohlschubspannungen auf der landseitigen Deichböschung bei Überströmung in Abhängigkeit vom spezifischen Abfluß

Man erkennt deutlich, daß der natürliche Erosionsschutz einer Grasnarbe der enormen Belastung einer Überströmung bei steilen Böschungen, wie sie im Deichbau der Regelfall sind, nicht lange standhalten kann. Selbst bei geringen Fließtiefen beträgt die wirkende Sohlschubspannung ein Vielfaches der kritischen Sohlschubspannung.

Die nach Gleichung (4) berechnete Froude-Zahl beträgt im Bereich des schießenden Normalabflusses über der landseitigen Böschung etwa 6. Eine Zusammenstellung der hydraulischen Parameter der Deichüberströmung ist in Tabelle 5-10 gegeben. Den Berechnungen liegt ein Strickler-Beiwert von $k_{st}=50 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ zugrunde.

Tabelle 5-10: Hydraulische Parameter der Deichüberströmung

Überstauhöhe h_u [m]	Abfluß über Deichkrone pro lfd. m q [m³/s/m]	Fließtiefe über dem Deichrücken (iteriert) h [m]	mittlere Überström- geschwindig- keit v_m [m/s]	Froudezahl Fr [-]	Sohlschub- spannung τ_0 [N/m²]
0,10	0,067	0,025	2,62	5,25	92,54
0,20	0,188	0,048	3,93	5,73	174,52
0,30	0,346	0,070	4,92	5,93	256,00
0,40	0,532	0,092	5,77	6,06	336,12
0,50	0,744	0,114	6,50	6,13	417,05
0,60	0,978	0,137	7,15	6,17	498,52
0,70	1,232	0,159	7,73	6,19	580,42
0,80	1,505	0,182	8,26	6,18	663,73
0,90	1,796	0,205	8,75	6,17	747,90
1,00	2,104	0,229	9,20	6,14	833,23

Neben der Belastung der Deichböschung durch die überströmungsbedingten Sohlschubspannungen kommen die Einwirkungen infolge der gleichzeitigen Durchströmung des Deichkörpers hinzu. Hier ist zu unterscheiden in die Durchsickerung von der Wasserseite zur Landseite aufgrund des Einstaus (Ausbildung einer stationären Sickerlinie in der Deichdichtung bzw. im Deichkörper; vgl. Abbildung 2-4) und die Infiltration des überströmenden Wassers in die Deichkrone und landseitige Böschung. Hierdurch erhöht sich im Vergleich zum Lastfall Einstau die Gefahr des Böschungsbruchs und die Gefahr von Rutschungen im Bereich des Oberbodens. Die für den Forschungsdeich in Biebesheim mittels 2D-FEM berechnete stationäre Verteilung der Potentiallinien im Deichkörper für den Lastfall Überströmen ist in Abbildung 5-56 dargestellt.

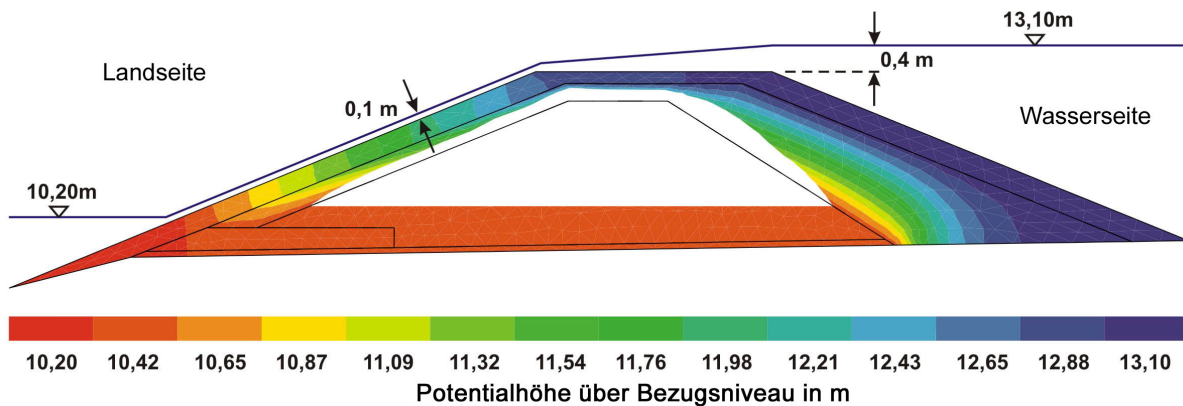


Abbildung 5-56: Berechnete Potentiallinien im Deichkörper des Forschungsdeichs bei Überstau der Deichkrone mit Überströmung der landseitigen Böschung; Querschnitt des stationären Zustands

Der Effekt einer böschungsp parallelen Durchströmung des Oberbodens ist bei dem Forschungsdeich besonders stark ausgeprägt, da Deichkrone und landseitige Böschung mit einer etwa 40 cm starken Lehmschicht zwischen Stützkörper und Oberboden versehen sind (vgl. Abschnitt 5.1.1), die das Eintreten von überströmendem Wasser verhindert.

5.2.5.2 Anforderungen an einen Erosionsschutz aus Geokunststoffen

Um die Erosionsgefahr und die damit verbundene Gefahr einer Breschenbildung bei überströmten Deichen zu reduzieren, erscheint die generelle Verbesserung der Erosionsstabilität von Deichoberflächen dringend ratsam, wenn man die weitere Erhöhung der Hauptdeiche vermeiden will. Um einen großflächigen Erosionsschutz realisieren zu können, muß dieser neben der Funktionalität vor allem kostengünstig sein. Hier sind neben den reinen Materialkosten natürlich die Baukosten für die Erstellung des Deckwerks von vorrangiger Bedeutung. Dabei gilt zu berücksichtigen, daß die Installation des Deckwerks nicht nur beim Neubau von Deichen möglich sein sollte, sondern auch als nachträgliche Sanierungsmaßnahme durchführbar ist. Der Erosionsschutz sollte daher relativ oberflächennah im Bereich der Krone und der landseitigen Böschung liegen.

Für die Umsetzung einer generellen Verbesserung der Erosionssicherheit von Flußdeichen bei Überströmung sind die bisher erprobten und vorrangig in Dämmen von Hochwasserrückhaltebecken eingesetzten Varianten eines Deckwerks daher nicht geeignet. Die in Abschnitt 5.2.4 beschriebenen Untersuchungen zu überströmungssicheren Deckwerken zielten nicht auf Bauweisen ab, die nachträglich im Rahmen von Sanierungsmaßnahmen angewandt werden können und gleichzeitig der sehr großen hydrodynamischen Beanspruchung von überströmten steilen Böschungen standhalten können.

Im Überströmungsfall muß das Deckwerk den folgenden Anforderungen genügen:

- Das Deckwerk darf sich nicht in seine Einzelkomponenten zerlegen und in Teilen erodiert werden.
- Das Deckwerk darf sich nicht von dem darunterliegenden Stützkörper abheben.
- Das Deckwerk darf nicht als Ganzes in einer flachen Gleitfuge abrutschen.

In allen Fällen wäre der somit freigelegte Deichkern den Erosionskräften ausgesetzt, was letztlich zum Versagen des Bauwerks führen würde. Wichtig ist also, daß die überströmungsbedingten Kräfte vom Deckwerk aufgenommen werden, und in den Stützkörper des Deichs abgeleitet werden.

Der große Vorteil, den ein aus Geokunststoffen bestehendes Deckwerk hat, ist die geringe Höhe der Matten. Der Erosionsschutz kann so (auch nachträglich) böschungsparell in den Oberboden integriert werden (Abbildung 5-57).

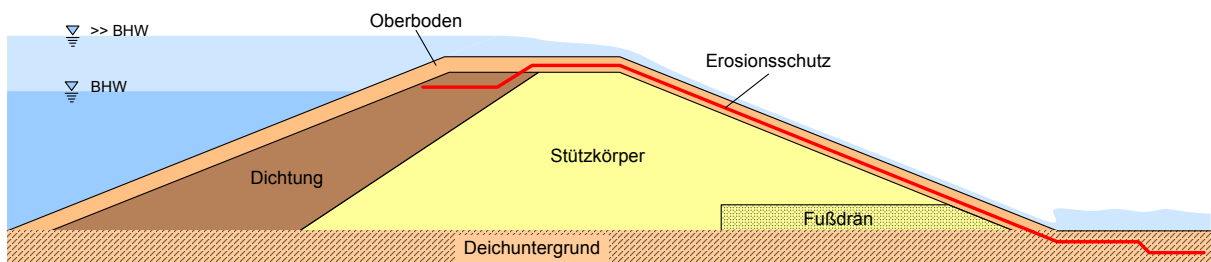


Abbildung 5-57: Deichquerschnitt mit landseitigem Erosionsschutz (schematisch)

Um den hohen Anforderungen zu genügen, muß ein derartiger Erosionsschutz sowohl eine hohe Zugfestigkeit aufweisen, als auch die Erosion des darüber und darunterliegenden Materials verhindern. Durch die Kombination unterschiedlicher, herkömmlicher Geokunststoff-Matten kann dies umgesetzt werden.

In den naturmaßstäblichen Versuchen am Forschungsdeich in Biebesheim soll ein Erosionsschutz untersucht werden, der aus einer Kombination von drei verschiedenen, herkömmlichen Geokunststoffmatten der Firma Naue hergestellt wird, und die oben genannten Anforderungen erfüllt. Das aus drei Komponenten bestehende Produkt ist in Abbildung 5-58 schematisch dargestellt.

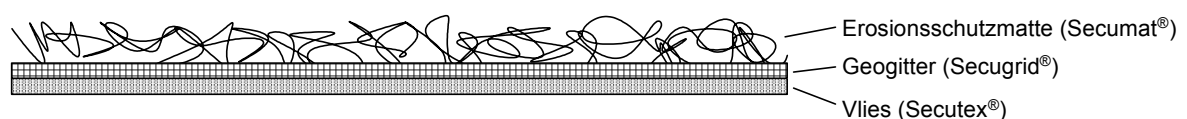


Abbildung 5-58: Erosionsschutz durch Kombination verschiedener herkömmlicher Geokunststoffprodukte der Firma Naue (schematisch)

Die zur Verwendung kommenden unterschiedlichen Geokunststoffe des Verbundprodukts sollen hier verschiedene Funktionen wahrnehmen:

- Die auftretenden, aus der Überströmung resultierenden Schubkräfte sollen vom Geogitter aufgenommen und über den Stützkörper abgetragen werden. Dies erfolgt durch eine Verankerung an der Deichkrone und eine zusätzliche flächige Vernagelung auf der binnenseitigen Böschung.
- Die mit dem Geogitter fest verbundene Erosionsschutzmatte soll den Oberboden zusammenhalten. Eine gut ausgebildete Durchwurzelung des Oberbodens kann so eine zusätzliche Stabilisierung der Böschungsoberfläche bewirken, da sie wie eine weitere Bewehrung wirkt. Der begrünte Oberboden soll daher nicht als Opferschicht behandelt werden, sondern als Teil des Erosionsschutzes auch Überströmungen standhalten können. Die zusätzliche Schutzwirkung der Grasnarbe soll jedoch nicht im Bemessungsansatz berücksichtigt werden.
- Die zusätzlich integrierte Vliesmatte soll im Falle einer stattfindenden Erosion des über dem Geokunststoff liegenden Oberbodens dafür sorgen, daß es nicht zu Ausspülungen von unter dem Deckwerk gelegenen Bodenpartikeln kommt.

Der Große Vorteil eines derartigen Erosionsschutzes liegt neben der Möglichkeit, die Geokunststoffmatten auch nachträglich in bestehende Deiche einbauen zu können, in der Integration des Oberbodens samt Grasnarbe in das Schutzkonzept. Bei allen herkömmlichen Deckwerkstypen wird die Grasnarbe, wenn sie überhaupt vorhanden ist, als landschaftliches Element behandelt. Sie dient also lediglich dazu, ein technisches Bauelement zu kaschieren. Zahlreiche Untersuchungen haben jedoch gezeigt, daß Graswurzeln wie eine Bewehrung im Boden wirken und bei Bodendeformation in der Lage sind, die auftretenden Zugkräfte aufzunehmen (z.B. Hähne 1991). Die Zugfestigkeit von Gräsern kann bis zu $86,5 \text{ MN/m}^2$ betragen, wobei eine maximale vertikale Durchwurzelungstiefe von bis zu 1,50 m möglich ist (Coppin & Richards 1990).

Der Aspekt der Bewehrungswirkung von Graswurzeln spielt insbesondere bei Böschungen eine große Rolle, da unbewachsene Böden nahe der Geländeoberfläche aufgrund der in diesem Bereich nur kleinen Normalspannungen geringe Scherfestigkeiten aufweisen (Pohl & Richwien 2006). Diese mangelnden Festigkeiten können durch die aus der Konzentration der Wurzelmasse in genau diesem Bereich resultierenden Durchwurzelungskohäsion kompensiert werden. Da eine Durchwurzelung aller drei Geokunststoffpräparate (Erosionsschutzmatte, Geogitter und Vliesstoffmatte) ungehindert möglich ist, wird der künstliche Erosionsschutz in Form des Kombiprodukts somit zusätzlich mit dem Oberboden und ggf. sogar mit dem Material des Stützkörpers durch die Graswurzeln verbunden. Der Erosionsschutz sollte jedoch so bemessen sein, daß er auch nach der Erosion des Oberbodens den Deichkern vor weiterer Erosion schützt.

Bei den naturmaßstäblichen Versuchen sollen daher die Geokunststoffmatten sowohl mit Oberboden angedeckt und mit ausgebildeter Grasnarbe, als auch unbedeckt der Überströmung ausgesetzt werden. Letztere Versuche simulieren den Zustand, bei dem der Oberboden samt Grasnarbe bereits erodiert wurde und stellen somit ein „Worst-Case-Scenario“ dar.

5.2.5.3 Bemessungsansatz des Erosionsschutzes aus Geokunststoffen

Der oben beschriebene Erosionsschutz in Form von dreilagigen Geokunststoffmatten muß an seinen Enden besonders gesichert werden, um mögliche Ablösungen durch das überströmende Wasser zu verhindern. Im Bereich der Deichkrone sollten die Matten daher oberstrom des Fließwechsels von strömendem nach schießendem Abfluß fixiert werden. Dies kann durch einen Verankerungsgraben erfolgen (s. Abbildung 5-57). Der Erosionsschutz sollte außerdem über den landseitigen Böschungsfuß hinweg bis hinter den Wechselsprung geführt werden, um die Entstehung von Fußkolken zu unterbinden. Die Geokunststoffmatten sollten dabei im Verankerungsgraben auf der Deichkrone mindestens 0,5 m und im Bereich des binnenseitigen Deichfußes mindestens 1 m tief in den Boden einbinden (CIRIA 1987).

Die auf den Erosionsschutz wirkenden Kräfte setzen sich aus den überströmungsbedingten Schubkräften und dem Gewicht der Matten samt dem darüberliegenden Oberboden zusammen. Für den größten Teil der überströmten landseitigen Deichböschung kann von gleichförmigen Abflußbedingungen (Normalabfluß) ausgegangen werden (vgl. Kapitel 5.2.5.1). Turbulenzbedingte Fluktuationen des Drucks und daraus resultierende Liftkräfte können für die Bemessung vernachlässigt werden (CIRIA 1987).

Die aus der Überströmung resultierenden Schubspannungen können je nach Lage in der Deichböschung in τ_1 , τ_2 und τ_3 unterteilt werden (Abbildung 5-59).

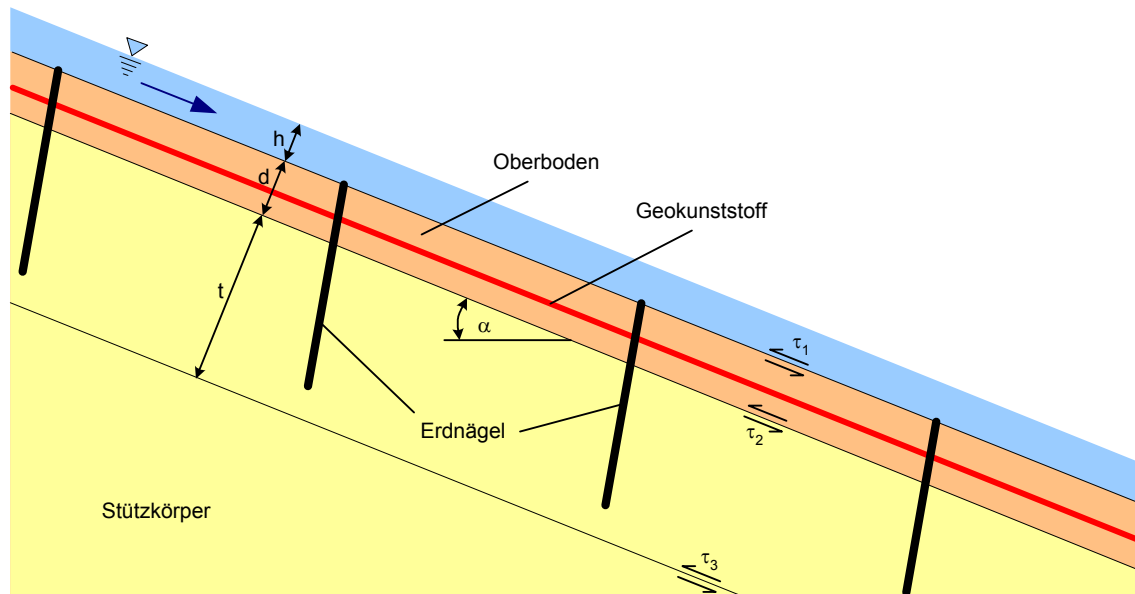


Abbildung 5-59: Wirkende Schubkräfte an einer überströmten Deichböschung

Die an der Grenze zwischen Wasser und Deckwerk (hier Geokunststoffmatte inklusive Oberboden) wirkende Schubspannung errechnet sich zu:

$$\tau_1 = \gamma_w \cdot h \cdot \sin \alpha \quad \text{in N/m}^2 \quad (7)$$

mit γ_w : Wichte des Wassers in N/m³
 h : Fließtiefe in m
 α : Böschungsneigung

Die Schubspannung zwischen Deckwerk und dem darunterliegenden Stützkörper errechnet sich zu:

$$\tau_2 = (\gamma_w \cdot h + \gamma_E \cdot d) \cdot \sin \alpha \quad \text{in N/m}^2 \quad (8)$$

mit γ_w : Wichte des Wassers in N/m³
 h : Fließtiefe in m
 γ_E : Wichte des Erosionsschutzes (Oberboden + Geokunststoff) in N/m³
 d : Dicke des Erosionsschutzes in m
 α : Böschungsneigung

Für die Annahme eines vollständig wassergesättigten Stützkörpers ergibt sich für die Schubspannung in einer Gleitfuge mit beliebigem Abstand t zur Unterkante des Oberbodens:

$$\tau_3 = (\gamma_w \cdot h + \gamma_E \cdot d + \gamma_S \cdot t) \cdot \sin \alpha \quad \text{in N/m}^2 \quad (9)$$

- mit γ_W : Wichte des Wassers in N/m³
 h : Fließtiefe in m
 γ_E : Wichte des Erosionsschutzes (Oberboden + Geokunststoff) in N/m³
 d : Dicke des Erosionsschutzes in m
 γ_S : Wichte des Stützkörpers in N/m³
 t : Lage der Gleitfuge unterhalb UK Oberboden in m
 α : Böschungsneigung

Um ein Abrutschen des Erosionsschutzes zu verhindern, müssen die mobilisierbaren Schubspannungen größer als die entgegenwirkenden überströmungsbedingten Schubspannungen sein (CIRIA 1987):

$$\tau_{Gr} + \tau_N + \mu \cdot d(\gamma_E - \gamma_W) \cdot \cos \alpha > (\gamma_W \cdot h + \gamma_E \cdot d) \cdot \sin \alpha \quad (10)$$

- mit τ_{Gr} : Scherwiderstand der Graswurzeln in N/m²
 τ_N : Scherwiderstand der Erdnägel in N/m²
 μ : Reibungskoeffizient zw. Oberboden und Stützkörper
(ca. 0,45 bis 0,5)
 d : Dicke des Erosionsschutzes in m
 h : Fließtiefe in m
 γ_W : Wichte des Wassers in N/m³
 γ_E : Wichte des Erosionsschutzes (Oberboden + Geokunststoff) in N/m³
 α : Böschungsneigung

Der Scherwiderstand von Graswurzeln wird in der Literatur mit 3 bis 5 kN/m² (CIRIA 1987) respektive 6 kN/m² (Pohl & Richwien 2007) angegeben. Bei einem Raster von 1x1 m ergeben Erdnägel mit einer Länge von 0,5 m und einem Durchmesser von 25 mm in einem Boden mit einer Scherfestigkeit von 50 kN/m² einen Scherwiderstand von etwa 1,5 kN/m² (CIRIA 1987).

Selbst bei Vernachlässigung des Scherwiderstands der Graswurzeln sollte ein vernagelter Erosionsschutz aus Geokunststoffmatten, der zusätzlich in der Deichkrone verankert ist, den überströmungsbedingten Belastungen standhalten. Da die Lastabtragung hier äußerst komplex ist, müssen die tatsächlich wirkenden Kräfte in den naturmaßstäblichen Versuchen näher untersucht werden. Die Überströmungsversuche am Forschungsdeich sollen so eine praxisgerechte Bemessung für einen derartigen Erosionsschutz ermöglichen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Deichbau und insbesondere Deichsanierung sind nicht nur in Deutschland von großer Bedeutung. Aufgrund der in den letzten Jahren weltweit sehr häufig aufgetretenen schweren Hochwasserereignisse und den damit verbundenen Überschwemmungen wurde deutlich, daß der Begutachtung des Zustands von bestehenden Hochwasserschutzdeichen und ggf. deren Sanierung ein hoher Stellenwert beigemessen werden muß. Beispiele, bei denen katastrophale Überflutungen aufgrund des Versagens von Deichen und Dämmen stattfanden, sind das Elbehochwasser im August 2002 in Ostdeutschland und Tschechien, das Auguthochwasser 2005 in Süddeutschland, Österreich und der Schweiz, aber auch die Überflutung von New Orleans nach dem Hurrikan Katrina im August 2005. Auch in Asien spielt der Hochwasserschutz durch Deiche eine sehr große Rolle. Die mit Überschwemmungen verbundenen regelmäßigen schweren Hochwasserereignisse an den großen Strömen in China z.B. fordern jährlich Menschenleben, zerstören Wohnungen, überfluten Industrieflächen und tragen so zur Armut der dortigen Bevölkerung bei und beinhalten ein enormes Gefährdungspotential für die Umwelt. Speziell am Gelben Fluß, in dessen Unterlauf die Flußsohle aufgrund der starken Sedimentation bereits deutlich über dem Geländeniveau liegt, hätten Deichbrüche katastrophale Folgen. Um auch zukünftig einen zuverlässigen Hochwasserschutz gewährleisten zu können, ist daher die regelmäßige Kontrolle und Instandsetzung der Deiche unabdingbar.

Durch die Verwendung von alternativen Baustoffen im Deichbau können Baukosten reduziert werden und die Standfestigkeit von Deichen erhöht werden. Die hier untersuchten Sekundärrohstoffe MV-Schlacke und RC-Baustoff zeichnen sich durch eine vergleichsweise hohe Scherfestigkeit aus. In den naturmaßstäblichen Einstauversuchen, die langanhaltende Hochwasserereignisse mit stationärer Durchsickerung des Deichkörpers simulierten, konnte zudem die Umweltverträglichkeit dieser Recyclingmaterialien nachgewiesen werden. Im Bereich des Straßenbaus werden derartige Sekundärrohstoffe auch seit Jahrzehnten erfolgreich eingesetzt. Eine durch den Gesetzgeber vorgeschriebene regelmäßige Eigen- und Fremdüberwachung bei der Aufbereitung garantiert eine gleichbleibende Güte der Sekundärrohstoffe, deren Kostenvorteil gegenüber natürlichen Baumaterialien durch die Bezuschussung der Aufbereitungsbetriebe nicht von der Hand zu weisen ist. Die in dieser Arbeit dargestellte Alternative, den Stützkörper von Deichen aus Sekundärrohstoffen zu erstellen, würde somit nicht nur das Problem der lokalen Verfügbarkeit von Baustoffen lösen, sondern könnte zu einer deutlichen Reduzierung der Baukosten beitragen. Da in Deutschland mit Inkrafttreten der Abfallablagerversordnung seit Juni 2005 Hausmüll und Gewerbeabfall nicht mehr deponiert werden darf, ist von einer deutlichen Zunahme der verfügbaren Mengen an MV-Schlacken auszugehen. Vor diesem Hintergrund erscheint die Verwendung von MV-Schlacken als Baustoff für Deiche naheliegend, da

hier aufgrund der sehr großen Längserstreckung und Querschnittsgeometrie beträchtliche Mengen an Baustoffen benötigt werden.

Um die Standsicherheit von Hochwasserschutzdeichen auch bei extremen Hochwasserereignissen, die deutlich über dem Bemessungshochwasser liegen, zu gewährleisten, müssen diese überströmungssicher gebaut werden. Ein Deich in herkömmlicher Bauweise kann, wie die Extremhochwässer der vergangenen Jahre gezeigt haben, einer längerandauernden Überströmung nicht standhalten, so daß eine große Gefahr von Breschenbildung und schließlich von weitläufigen Deichbrüchen besteht. Im Gegensatz zu den im Dammbau gängigen Deckwerken, die einen schadfreien Hochwasserabfluß über die Dammkrone ermöglichen müssen, sollte ein im Deichbau generell anwendbarer Erosionsschutz möglichst kostengünstig sein und auch nachträglich in bestehende Deiche integrierbar sein. Die hier vorgestellte Variante eines Erosionsschutzes aus einer dreilagigen Geokunststoffmatte, die in den Oberboden der binnenseitigen Deichböschung integriert wird, soll der Überströmung im Hochwasserfall standhalten. In der Vergangenheit durchgeführte Versuche an steilen, grasbewachsenen und mit Geokunststoffen bewehrten Böschungen hatten bereits eine deutliche Verbesserung der Erosionsschutzwirkung gegenüber Böschungen, die nur durch eine Grasnarbe geschützt waren, gezeigt. Die Funktions- und Praxistauglichkeit dieses Erosionsschutzes soll nun in naturmaßstäblichen Versuchen an einem Forschungsdeich verifiziert werden, sowie eine genaue Bemessung der Verankerung der Geokunststoffmatten erzielt werden.

Die in dieser Arbeit vorgestellten innovativen Sanierungsverfahren sind nicht ausschließlich für Flußdeiche anwendbar, sondern lassen sich ohne größere Einschränkungen auf Seedeiche übertragen. Seedeiche werden in der Regel nach wie vor aus einem Sandkern, der mit einer darüberliegenden Kleiabdeckung versehen wird, errichtet. Bei üblichen Deichhöhen von über 7 m an der deutschen Nordseeküste stellt auch hier der enorme Materialbedarf an natürlichen Baustoffen ein wachsendes Problem dar, dem durch die Verwendung von Sekundärrohstoffen als Baustoff für den Stützkörper bzw. Deichkern entgegengewirkt werden kann. Die bei den Einstauversuchen gemessenen Überschreitungen der Grenzwerte der Trinkwasserverordnung bei den Parametern Chlorid, Sulfat und elektrische Leitfähigkeit erscheinen bei der Betrachtung von Seedeichen zudem in einem anderen Licht, da die gemessenen Gehalte hier den natürlichen Konzentrationen des Seewassers gegenübergestellt werden müssen. Die natürliche Salinität der Nordsee von rund 3 ‰ bzw. 30 g/l beträgt etwa das zehnfache der in den Einstauversuchen maximal gemessenen Chloridkonzentration.

Auch die Verwendung von Geokunststoffen als Erosionsschutz bietet sich bei Seedeichen an, da der gegenwärtig als Dichtung und Erosionsschutz verwendete Kleiboden nur in begrenztem Umfang verfügbar ist. Zur Sicherung der binnenseitigen Deichböschung, die bei Sturmfluten durch überlaufende Wellen beansprucht wird,

wäre ein Erosionsschutz in Form des hier vorgestellten, aus drei herkömmlichen Geokunststoffmatten bestehenden Kombiprodukts zudem weitaus besser geeignet. Die Verwendung von Klei als Abdeckung der landseitigen Deichböschung führt durch die geringe Durchlässigkeit dieses Materials zur Versiegelung der Oberfläche. Dies birgt die Gefahr eines Böschungsbruchs durch Strömungskräfte, die von innen auf die Kleiabdeckung wirken. Beim alternativen Einsatz eines oberflächennahen Erosionsschutzes durch Geokunststoffmatten würde anfallendes Sickerwasser aus dem Deichkörper schadlos abgeführt werden. Außerdem bietet diese Bauform eine deutlich höhere Sicherheit gegen überströmungsbedingte Erosion und somit gegen Deichbrüche.

7 Literatur

7.1 Normen und sonstige Richtlinien und Regelwerke

DIN 18127: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben: Proctorversuch; Normausschuß Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag, Berlin 1997

DIN 18137: Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte: Bestimmung der Scherfestigkeit; Triaxialversuch; Normausschuß Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag, Berlin 1990

DIN 19712: Flußdeiche; Normausschuß Wasserwesen (NAW) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag, Berlin 1997

DIN 38414, Teil 4: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Schlamm und Sedimente (Gruppe S), Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S4), Beuth-Verlag, Berlin 1984

DVWK-MERKBLATT 209: Wahl des Bemessungshochwassers; Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Heft 209, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin 1989

DVWK-MERKBLATT 210: Flußdeiche; Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Heft 210, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin 1986

DVWK-MERKBLATT 251: Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen; Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Heft 251, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin 1999

DWA-REGELWERK: Merkblatt DWA-M 507 (Entwurf), Deiche an Fließgewässern; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef 2007

DWD: Starkniederschlagshöhen für die Bundesrepublik Deutschland; Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach 1997

EAU: Empfehlungen des Arbeitskreises Ufereinfassungen der DGEG, 7.Auflage; Verlag Ernst und Sohn, Berlin 1990

EVU: Empfehlungen für Verklammerung und Vollverguß von Uferschutzwerken und Sohlensicherung; Arbeitskreis „Verklammerung und Vollverguß von Uferschutzwerken und Sohlensicherungen“, Bauberatung Zement, Köln 1990

HWG: Hessisches Wassergesetz vom 6. Mai 2005, GVBl. I S. 305, Verkündet am 12. Mai 2005

LAGA 20: Mitteilung der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall, Heft 20, Merkblatt über Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen, Technische Regeln. Erich Schmidt-Verlag, Neuburg 1995

LFU BADEN-WÜRTTEMBERG: Überströmbare Dämme und Dammscharten; Oberirdische Gewässer, Gewässerökologie 90, Landesamt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe 2004

LFU BADEN-WÜRTTEMBERG: Festlegung des Bemessungshochwassers für Anlagen des technischen Hochwasserschutzes; Leitfaden, Landesamt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe 2005

MLR SCHLESWIG-HOLSTEIN: Generalplan Küstenschutz, Integriertes Küstenschutzmanagement in Schleswig-Holstein; Ministerium für ländliche Räume, Landesplanung, Landwirtschaft und Tourismus des Landes Schleswig-Holstein, Kiel 2001

PREN: Geokunststoffe, Begriffe und ihre Definitionen; Entwurf N 155 der WG 2 des CEN/TC 189, Juni 2000

RG MIN-STB 93: Richtlinien für die Güteüberwachung von Mineralstoffen im Straßenbau; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV-Verlag, Köln 1993

RP DARMSTADT: Instruktion zur Deichverteidigung; Regierungspräsidium Darmstadt, Darmstadt 2006

SCHNEIDER: Bautabellen für Ingenieure, mit europäischen und nationalen Vorschriften; 11. Auflage, Werner-Verlag, Düsseldorf 1994

TL MIN-STB 2000: Technische Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV-Verlag, Köln 2000

TRINKWV: Verordnung über die Qualität von Trinkwasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung); Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft, Bundesgesetzblatt Jahrgang 2001, Teil I Nr. 24, Berlin 2001

7.2 Veröffentlichungen

BRAHMS, A.: Anfangs – Gründe der Deich- und Wasserbaukunst, Teil 1 + 2; Hrsg.: Marschenrat, Schuster-Verlag, 1767/1773 Leer

BÖHME, M.; OCKENFELD, K.: Die Flutkatastrophe im Elbe-Einzugsgebiet 2002 im Rückblick; Schadstoffbelastung nach dem Elbe-Hochwasser 2002, UFZ – Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH, Magdeburg 2005

COPPIN, N. J.; RICHARDS, I. G: Use of Vegetation in Civil Engineering, CIRIA/Butterworths, London 1990

- EHLERS, P.; WINKEL, R.: Bau, Unterhaltung und Verteidigung der Flußdeiche, 2. Auflage; Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1974
- HÄHNE, K.: Der Einfluß von Gräser- und Gehölzwurzeln auf die Scherfestigkeit von Böden und damit auf die Standsicherheit von Hängen und Böschungen – Dissertation; Institut für Landschaftsbau, Fachbereich Landschaftsentwicklung der Technischen Universität Berlin, Berlin 1991
- HASELSTEINER, R.: Hochwasserschutzeiche an Fließgewässern und ihre Durchsicherung – Dissertation; Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität München, München 2007
- HÜBNER, C.; SCHLAEGER, S.; BECKER, R.; SCHEUERMANN, A.; BRANDELIK, A.; SCHAEDEL, W.; SCHUHMANN, R.: Advanced Measurement Methods in Time Domain Reflectometry for Soil Moisture Determination; Springer Verlag, Berlin 2003
- KRAMER, J.: Entwicklung der Deichbautechnik an der Nordseeküste; Historischer Küstenschutz, Stuttgart 1992
- KRÜGER, F.: Schadstoffe in der Hochwasserwelle; Schadstoffbelastung nach dem Elbe-Hochwasser 2002, UFZ – Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH, Magdeburg 2005
- VON LIEBERMANN, N.: Leitbildmodell für den Küstenschutz der Nordseeküste am Beispiel der Vorländer – Dissertation; Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Hannover 1999
- PALMER, V. J.: A method of designing vegetated spillways; Agricultural Engineering, 1945
- PFRANG-STOTZ, G; REICHELT, J.: Müllverbrennungsschlacken. Mineralogie, Elutionsverhalten und technische Eigenschaften; Baustoff Recycling und Deponietechnik, 12 (1996) Nr. 2, Giesel Verlag, Isernhagen 1996
- PFRANG-STOTZ, G; REICHELT, J.: Charakterisierung und Bewertung von Müllverbrennungsschlacken aus 15 Müllverbrennungsanlagen unterschiedlicher Verfahrenstechnik; Müll und Abfall, 31 (1999), Erich Schmidt Verlag, Berlin 1999
- POHL, C.; RICHWIEN, W.: Die Bemessung der Außenböschung von Seedeichen unter Ansatz des festigkeitssteigernden Einflusses der Grasnarbe; Sicherung von Dämmen, Deichen und Stauanlagen, Handbuch für Theorie und Praxis Vol. II, Universität Siegen, Siegen 2006
- SAATHOFF, F.; ZITSCHER, F.-F.: Geokunststoffe in der Geotechnik und im Wasserbau; Grundbau-Taschenbuch Teil 2: Geotechnische Verfahren, sechste Auflage, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, Berlin 2001

- SCHEUERMANN, A.; BRAUNS, J.; SCHLAEGER, S.; BECKER, R.; HÜBNER, C.: Monitoring von Dämmen und Deichen mittels TDR; 11. Feuchtetag 2002, Proceedings, S. 187-196, Weimar 2002
- SCHLAEGER, S.: Inversion von TDR-Messungen zur Rekonstruktion räumlich verteilter bodenphysikalischer Parameter – Dissertation, Veröffentlichungen des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe, Heft 156, Karlsruhe 2002
- SCHMIDT, M.: Hochwasser und Hochwasserschutz in Deutschland vor 1850 – eine Auswertung der Quellen und Karten; Oldenbourg Industrieverlag, München 2000
- STEUERNAGEL, J.; ZANKE, U.: Neuartige Sanierungsverfahren von Flußdeichen unter Verwendung von Recyclingmaterial und Geotextilien; Sicherung von Dämmen, Deichen und Stauanlagen, Handbuch für Theorie und Praxis Vol. II, Universität Siegen, Siegen 2006
- QUEIBER, J.: Entwicklung landschaftsverträglicher Bauweisen für überströmbare Dämme; Mitteilungen des Instituts für Wasser und Gewässerentwicklung – Bereich Wasserwirtschaft und Kulturtechnik – der Universität Karlsruhe (TH), Heft 233, Karlsruhe 2006
- ZWACH, W.: Hochwasserschutz durch Deiche; Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität Darmstadt, Heft 129, Darmstadt 2003

7.3 Forschungsberichte

- Az: 18063: Schonung natürlicher Ressourcen durch den Einsatz von Recyclingmaterialien als Baustoff für Flußdeiche; Technische Universität Darmstadt, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft und Universität Karlsruhe (TH), Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen, gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU), Darmstadt 2005
- CIRIA REPORT 116: Design of reinforced grass waterways; Construction Industry Research and Information Association (CIRIA), London 1987
- FKZ: BWC 20004 + BWT 22005: Neue naturnahe Bauweisen für überströmbare Dämme an dezentralen Hochwasserrückhaltebecken und Erprobung von Erkundungsmethoden zur Beurteilung der Sicherheit von Absperrdämmen; Universität Stuttgart, Institut für Wasserbau, gefördert im Rahmen des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung (BWPLUS) des Landes Baden-Württemberg, Stuttgart 2003, 2004

FKZ: BWC 20005 + BWT 22004: Überströmbare Dämme – landschaftsverträgliche Ausführungsvarianten für den dezentralen Hochwasserschutz in Baden-Württemberg; Universität Karlsruhe, Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, gefördert im Rahmen des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung (BWPLUS) des Landes Baden-Württemberg, Karlsruhe 2004

8 Anhang – Begriffsdefinitionen

8.1 Deicharten

Entsprechend ihrer Lage zum Gewässer und ihrer Funktion unterscheidet man gemäß Definition in DIN 19712 folgende Deicharten (Abbildung 8-1):

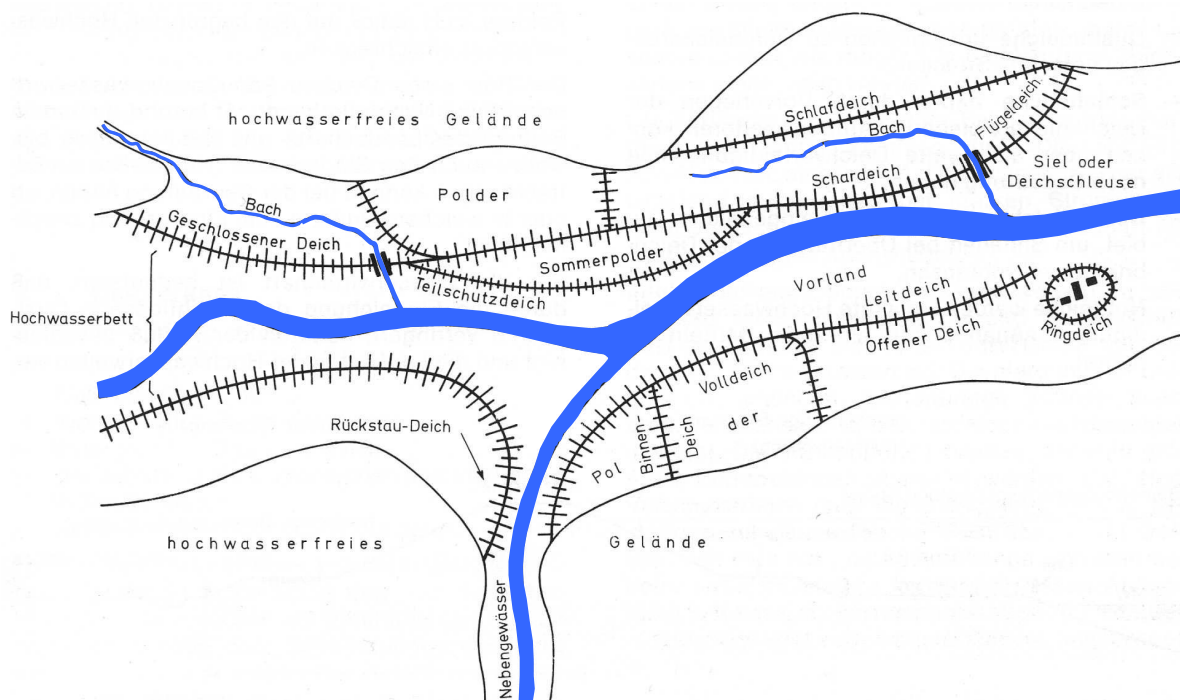


Abbildung 8-1: Deicharten nach DIN 19712

- **Winterdeich (Voll- oder Hauptdeich)**
Bemessung gegen große und seltene Hochwasser
- **Sommerdeich (Teilschutz- oder Vordeich)**
schützt in der Regel landwirtschaftlich genutzte Flächen gegen kleinere und mittlere, aber entsprechend häufige Hochwasser
- **Qualmdeich (Quelldeich)**
umschließt Flächen mit erhöhtem Drängewasseranfall
- **Notdeich**
wird als akute Hochwasserverteidigungsmaßnahme errichtet
- **Schlafdeich**
hat durch Verlegen der Deichlinie seine bisherige Aufgabe verloren, kann aber als zweite Deichlinie noch von Bedeutung sein
- **Geschlossener Deich**
schließt an beiden Enden an hochliegendes Gelände an

- **Offener Deich**
wird nur oberstrom an hochliegendes Gelände angeschlossen und kann von unterstrom landseitig eingestaut werden
- **Ringdeich**
umgibt das zu schützende Gelände allseitig
- **Flügeldeich**
verbindet Deichstrecken am Gewässer mit hochliegendem Gelände
- **Leitdeich**
lenkt den Hochwasserabfluß in die bestimmte Richtung
- **Schar- und Pralldeich**
direkt am Gewässer gelegen, ohne Vorland
- **Rückstaudeich**
begleitet Nebengewässer vom Deich des Hauptgewässers aus so weit, wie der Rückstau einfluß des Bemessungshochwassers von dort reicht
- **Binnendeich (Schottdeich)**
unterteilt Polder, um Schäden bei Überflutung oder Deichbrüchen einzugrenzen

8.2 Im Deichbau gebräuchliche Begriffe

Aufkaden:

Erhöhung der Deichkrone oder eines Deichübergangs bei Überströmungsgefahr (→Kadung)

Außenböschung (wasserseitige Böschung):

Die dem Gewässer zugekehrte Böschung; in der Regel durch Rasenanfaat, bei direktem Auftreffen der Strömung durch Deckwerke befestigte Deichfläche

Berme:

Waagrecht oder schwach geneigter Absatz in der Böschung des Deichs; liegt über der durchschnittlichen Geländehöhe und stabilisiert den Deich; häufig landseitig als befestigter Deichverteidigungsweg ausgebildet

Bemessungshochwasserstand

(BHW oder HW_B):

Der für Deichbauten festgelegte Ausbauwasserstand

Binnenböschung (landseitige Böschung):

Die dem Land zugekehrte Böschungsseite

Binnendeich:

Unterteilt das eingedeichte Gebiet (Polder), um Schäden bei Überflutung oder Deichbrüchen einzugrenzen

Deckwerk:

Erosionsschutz an der Oberfläche von Böschungen und an Flußsohlen, der durch Verbund und/oder Gewicht den angreifenden Kräften Widerstand leistet

Deich:

Damm aus Erd- und Baustoffen an Fließ- und Küstengewässern zum Schutz des Hinterlandes gegen Hochwasser; wird im Gegensatz zu Stauhaltungs-dämmen nur bei Hochwasser beansprucht

Deichbresche:

Die nach einem Deichbruch oder planmäßiger Deichschlitzung zurückbleibende Deichlücke

Deichfuß:

Der sich örtlich abzeichnende Übergang zwischen dem nahezu ebenen Vorland oder Hinterland und der Deichböschung

Deichhinterland:

Dem Deich landseitig vorgelagerte Fläche

Deichkrone:

Obere waagrechte, schwach gewölbte oder schwach zur Wasserseite geneigte Fläche des Deichs

Deichlager (auch Deichbasis):

Die vom wasserseitigen bis zum landseitigen Deichfuß reichende Grundfläche des aufgeschütteten Deichkörpers

Deichlinie:

Verlauf des Deichs mit allen Bauwerken und Anlagen

Deichscharte:

Durch Tore oder Dammbalken verschließbare Öffnung im Deich, zur Durchführung eines Weges oder zum Ein- oder Auslassen von Hochwasser

Deichschulter:

Übergangsbereich von der Deichkrone zur Deichböschung

Deichseitengraben:

An der Landseite des Deichs angeordneter Graben zur Ableitung des durch den Deich bzw. Deichuntergrund sickern den Wassers

Deichverteidigung:

Sofortmaßnahmen im Hochwasserfall zur Aufrechterhaltung der Funktion eines Deichs bei drohendem Versagen

Deichverteidigungsweg:

Weg am landseitigen Deichfuß oder auf landseitiger Berme, der auch für schwere Fahrzeuge befahrbar ist und dem sicheren und schnellen Transport bei der Deichverteidigung und Unterhaltung dient; die Deichkrone darf nur im Ausnahmefall zur Anlage eines solchen Weges genutzt werden

Deichvorland:

Dem Deich wasserseitig vorgelagerte Fläche bis zum Fließgewässer

Drän:

Bauelement zur drucklosen Entwässerung des Deichs

Drängewasser:

Unterhalb der Sickerlinie den Deich und den Untergrund unter Druck durchströmendes Wasser

Einkaden:

Kadung an der Binnenseite eines Deichs – am Deichfuß beginnend – zum Einschließen von durchsickern dem Wasser, damit sich sammelndes Wasser hydraulisch einen Gegendruck erzeugt (→Kadung)

Eisaufschub:

Durch die Strömung erfolgtes Auf-schieben von Treibeisschollen auf die

Außenböschung oder auf die Deichkrone

Eisgang:

Bewegung des Eises an der Oberfläche fließender Gewässer in Form mehr oder weniger großer Eisschollen

Erosion:

Alle Vorgänge, die auf der Erdoberfläche durch in Bewegung befindliche Medien (Wasser, Eis, Wind) zu Abtrag und Massenverlagerungen von Böden, Lockergesteinen und Festgesteinen führen; die innere Erosion findet in größeren, meist röhrenförmigen Hohlräumen im Inneren eines Erdkörpers statt, die oft bereits vor Beginn der inneren Erosion durch pflanzliche oder tierische Einwirkungen (Wurzelgänge, Wühltiergänge) oder durch Auswaschung und Erweiterung eines Porenkanals (→Suffosion) entstanden sind

Flutungspolder:

Eingedeichte, meist als Grünland genutzte Flächen, die nur bei Eintreten eines kritischen Wasserstandes zur Entlastung der Hauptdeiche oder zum Schutz von am Unterwasser liegenden hochwassergefährdeten Gebieten planmäßig geflutet werden; die planmäßig gesteuerte Flutung erfolgt über eingebaute Deichscharten, Wehre oder örtliche Deichschlitzungen

Freibord:

Festgelegter vertikaler Abstand zwischen der Deichkrone und dem Bemessungshochwasserstand; seine Größe ist abhängig von der Bedeutung des Deichs, der Wasserstandshöhe über Gelände, der Windwirklänge und

der möglichen Windgeschwindigkeit, die wiederum die Wellenhöhe und den Wellenlauf bestimmt

Grundbruch (hydraulischer Grundbruch):

Unter hydraulischem Grundbruch wird der Aufbruch eines Deichkörpers bei überwiegend aufsteigender Grundwasserströmung verstanden, wenn das Eigengewicht des unter Auftrieb stehenden Erdkörpers zuzüglich der Reibungs- und Kohäsionskräfte kleiner als die Grundwasserströmungskraft wird

Grundeis:

Eis, das sich an der Sohle oder unter Wasser an den Böschungen eines Gewässers gebildet hat; kann extremes Aufstauen des Gewässers bewirken

Hauptdeich:

Erddamm zum Schutz von Siedlungs- und Niederungsgebieten gegen große und seltene Hochwasser; regional auch als Winter- oder Volldeich bezeichnet.

Hochwasserabflußfläche:

Flächen mit fließendem Wasser während eines Hochwassers und mit einer höchstens geringfügigen Speicherwirkung und Durchflußverzögerung

Hochwassergefährdetes Gebiet:

Gebiete bzw. Flächen, die nach historischen und hydrologischen Erkenntnissen bei Hochwasser überschwemmt oder durchflossen werden

Hochwasserrückhaltefläche:

Zeitweilig stehende Gewässerflächen oder Flächen mit erheblicher Durchflußverzögerung während eines Hoch-

wassers infolge der Speicherwirkung natürlicher Gegebenheiten oder künstlicher Maßnahmen

Kadung:

Temporäre, behelfsmäßige Deicherhöhung

Kolk:

Örtlich begrenzte, durch Strömungsvorgänge hervorgerufene Vertiefung im Gewässerbett und an der Böschung

Notdeich:

Mit einfachen Mitteln als akute Hochwasserverteidigungsmaßnahme errichteter Wall

Pegel:

Einrichtung zum Messen des Wasserstands

Polder:

→ Flutungspolder

Qualmdeich (auch Quelldeich):

Relativ kleiner Erdbaudamm, der landseitig etwa parallel zum Deich errichtet wird und am Hauptdeich anschließt; er hindert das durch den Deichkörper bzw. durch den Untergrund strömende Sickerwasser am Abfließen und bewirkt damit einen Gegendruck; er trägt erheblich zur Erhöhung der Standsicherheit des Hauptdeichs bei

Qualmwasser:

Hinter der Binnenseite des Deichs austretendes Drängewasser

Rückschreitende Erosion:

Auf der Binnenseite beginnende und sich zur Wasserseite fortpflanzende Erosion

Rückstauedeich:

Begleitet Nebengewässer vom Deich des Hauptgewässers aus so weit, daß keine Überflutung des gegen Hochwasser zu schützenden Gebiets durch Rückstau eintreten kann

Schardeich (auch Pralldeich):

Deich ohne Vorland, dessen Böschung unmittelbar in die Uferböschung übergeht

Schöpfwerk:

Pumpwerk, das bei anstehendem Hochwasser die künstliche Entwässerung des Polders sichert

Sickerlinie:

Wasserspiegellinie des den Deich durchströmenden Wassers

Sickerwasser:

Wasser, das einen Deich durchströmt

Siel:

Bauwerk zum Durchführen eines Wasserlaufs durch einen Deich mit einer wasserseitigen Verschlusvorrichtung; örtlich auch Deichschleuse genannt

Sommerdeich:

Deich, der in der Regel landwirtschaftlich genutzte Flächen gegen kleine und mittlere, aber entsprechend häufige Hochwasser schützt und zeitweise überströmt werden kann

Stützkörper:

Leitet die auf den Deich wirkenden Kräfte in den Untergrund; im Vergleich zur Dichtung deutlich höhere Wasserdurchlässigkeit

Suffosion:

Vorgang, bei dem die feineren Bodenteilchen von der Sickerströmung im

Boden umgelagert werden; sie werden dabei durch die Poren der gröberen Bodenpartikel hindurch transportiert. Dabei bleibt das Volumen des Bodens zunächst konstant, weil sich die gröberen Bodenkörner noch gegenseitig abstützen. Eine schädliche Durchsickerung kann zunehmen und die Stabilität des Bodenkörpers auch plötzlich abnehmen (Kollapsgefahr).

Überschwemmungsgebiet:

Gebiete zwischen oberirdischen Gewässern und Deichen oder Hochufern, sowie sonstige Gebiete, die bei einem maßgebenden Hochwasser (Bemessungshochwasser) überschwemmt, durchflossen oder für die Hochwasserentlastung oder Rückhaltung beansprucht werden

„O du Ausgeburt der Hölle!
Soll das ganze Haus ersaufen?
Seh ich über jede Schwelle
doch schon Wasserströme laufen.
[...]

Und sie laufen! Naß und nässer
wirds im Saal und auf den Stufen.
Welch entsetzliches Gewässer!
Herr und Meister, hör mich rufen! –
Ach, da kommt der Meister!
Herr, die Not ist groß!
Die ich rief, die Geister,
werd ich nun nicht los.“

*Johann Wolfgang von Goethe,
Der Zauberlehrling*

Anlage 1: Zeitlicher Verlauf der Sickerwasserpegelstände

